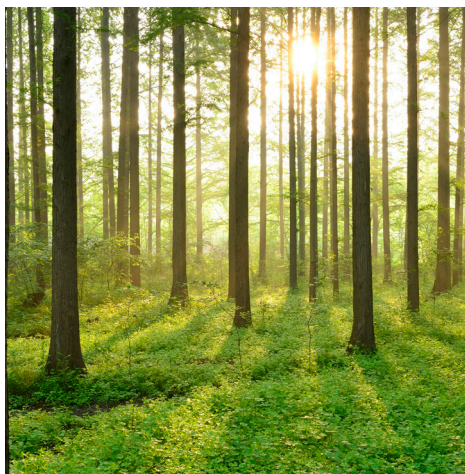


# HANDBOK FÖR LIVSLÄNGDSARBETE MED ENERGIANLÄGGNINGAR

RAPPORT 2015:150





# **Handbok för livslängdsarbete med energianläggningar**

Utgåva 3

JAN STORESUND, INSPECTA TECHNOLOGY AB, REDAKTÖR

ISBN 978-91-7673-150-5 | © 2015 ENERGIFORSK

Energiforsk AB | Telefon: 08-677 25 30 | E-post: [kontakt@energiforsk.se](mailto:kontakt@energiforsk.se) | [www.energiforsk.se](http://www.energiforsk.se)





## FÖRORD

Denna rapport är slutrapportering av projekt M 37787 (Energimyndighetens projektnummer P 37787) som faller under teknikområde material- och kemiteknik, men även under anläggnings- och förbränningsteknik inom SEBRA, samverkansprogrammet för bränslebaserad el- och värmeproduktion.

Projektets syfte har varit att göra en genomgripande uppdatering av Värmeforsks livslängdshandbok till dagens kunskapsnivå.

Projektledare har varit Jan Storesund, Inspecta Technology AB och arbetet har följts av en referensgrupp bestående av Martin Petersen, Grontmij och Rikard Norling, Swerea KIMAB.

SEBRA, samverkansprogrammet för bränslebaserad el- och värmeproduktion, är efterföljaren till Värmeforsks Basprogram och startade som ett samarbetsprogram mellan Värmeforsk och Energimyndigheten 2013. All forskningsverksamhet som bedrevs inom Värmeforsk ingår sedan den 1 januari 2015 i Energiforsk. Därför ges denna rapport ut som en Energiforskrapport.

Programmets övergripande mål är att bidra till långsiktig utveckling av effektiva miljövänliga energisystemlösningar. Syftet är att medverka till framtagning av flexibla bränslebaserade anläggningar som kan anpassas till framtida behov och krav. Programmet är indelat i fyra teknikområden: anläggnings- och förbränningsteknik, processtyrning, material- och kemiteknik samt systemteknik.

Stockholm oktober 2015

Helena Sellerholm

Områdesansvarig

Bränslebaserad el- och värmeproduktion, Energiforsk AB

## Författarnas förord

Handboken för livslängdsarbete med energianläggningar publicerades 2001 och en andra utgåva utkom 2004. Det var redan från början uttalat att handboken skulle vara ett levande dokument och att regelbundna uppdateringar har stor betydelse för handbokens användbarhet. Under de 10 år som har gått sedan upplaga 2 gavs ut har utvecklingen varit remarkabel på vissa områden. Det gäller t.ex. metoder för oförstörande provning som ger helt nya möjligheter att kartlägga status hos en komponent med avseende på eventuella skador. Man använder i många fall andra bränslen än för 10 år sedan och nya (eller andra) material har fått användning. Omfattande forskning pågår. Bara en sådan sak som ytterligare 10 års samlad erfarenhet har stor betydelse för livslängdsarbetet. I den tredje utgåvan har allt detta studerats och sammanställts. I enlighet med tidigare utgåvor är handlar det inte bara att sammanställa tillgänglig information. Det väsentliga är att koppla ihop ny teknik med nyvunna erfarenheter och applicera detta på, samt vidareutveckla, konceptet för livslängdsarbete

## Författarförteckning

I förteckningen nedan anges vilka kapitel som de olika författarna har skrivit i del 1 och 2 samt författare till del 3. Fet stil innebär huvudförfattare eller ensam författare och ordinär stil delförfattare till kapitlet. I utgåva 3 är kapitel 2.5.8 och 2.5.9 helt nya och följande kapitel har kompletterats eller omarbetats i betydande omfattning: 1.1, 1.3, 1.5, 1.6, 1.8, 1.9, 2.1 och 2.2.

### INLEDNING

Jan Storesund

### DEL 1 ALLMÄN DEL

|                     |                                              |
|---------------------|----------------------------------------------|
| Jan Storesund       | kap. 1.2, 1.3, 1.4, 1.5, 1.6, 1.7, 1.9, 1.11 |
| Peter Segle         | 1.3, 1.8                                     |
| Rolf Ingman         | 1.1, 1.2, 1.3, 1.4                           |
| Jens Gunnars        | 1.9                                          |
| Dhananjay Kumar     | 1.10                                         |
| Pernilla Andreasson | 1.5.3                                        |

### DEL 2 MEKANISKA KOMPONENTER

|                 |                                                                     |
|-----------------|---------------------------------------------------------------------|
| Jan Storesund   | 2.1.1, 2.1.2, 2.1.3, 2.1.4, 2.1.5, 2.1.10, 2.2, 2.4.4, 2.5.8, 2.5.9 |
| Agne Gustafsson | 2.1.1, 2.1.6, 2.1.7, 2.1.8, 2.1. 2.5.2, 2.5.3, 2.5.4                |
| Göran Sund      | 2.4.1, 2.4.2, 2.4.3 2.5.6, 2.5.7.                                   |
| Juha Kerttula   | 2.3.3                                                               |
| Pertti Auerkari | 2.3.1, 2.3.2                                                        |
| Jan Rönnberg    | 2.3                                                                 |
| Paul Ingvarsson | 2.5.5                                                               |
| Peter Segle     | 2.5.1                                                               |
| Tapani Karhinen | 2.3.2                                                               |
| Leif Kiessling  | 2.2.2, 2.2.6                                                        |

### DEL 3 EXEMPEL

3.1 Livslängdsanalys av en ångpanna i ett kraftvärmeverk:

Leif Kiessling

Niklas Johansson

Karin Törnblom

Jan Rönnberg

Jan Storesund

3.2 Livslängdsanalys av en ångturbin i ett kraftvärmeverk:

Anna Samuelsson

Bilaga 1 Nomenklatur:

Jan Storesund

Peter Segle

## Summary

The handbook consists of three parts:

General section

Mechanical components

Examples

The general section gives to begin with a description of power and heat technology. Then follows the different constituents that are have importance for power plant life time management. The titles of the different subsections indicate the content:

- Assessment of the condition of a plant and its remaining lifetime.
- Strategies and targets for the life time assessment.
- Damage mechanisms
- Non-destructive testing
- Destructive testing
- Solid mechanics and damage tolerance analysis
- Risk based methods for inspection and maintenance planning
- Economy and economic life time
- Practical work with lifetime assessments

The subtitles for the sections above indicate what is important to notice within the life assessment. In addition, the different methods and mechanisms that exist are enumerated. An overview is thereby given in the list of contents.

The handbook is disposed in such a way that the structure of the plant can be overviewed relatively easily. In general, the plant is divided in three levels:

1. Plant level
2. System level
3. Component level

By these levels the work of lifetime assessments is divided in larger and smaller perspectives. The aim of the life time work and the economic together with the strategic questions within this aim can involve significant differences between these levels. This is high lightened in section 1-3 "Assessment of the condition of a plant and its remaining life time".

An overview of the plant parts and systems is given by an example in Figure 1.

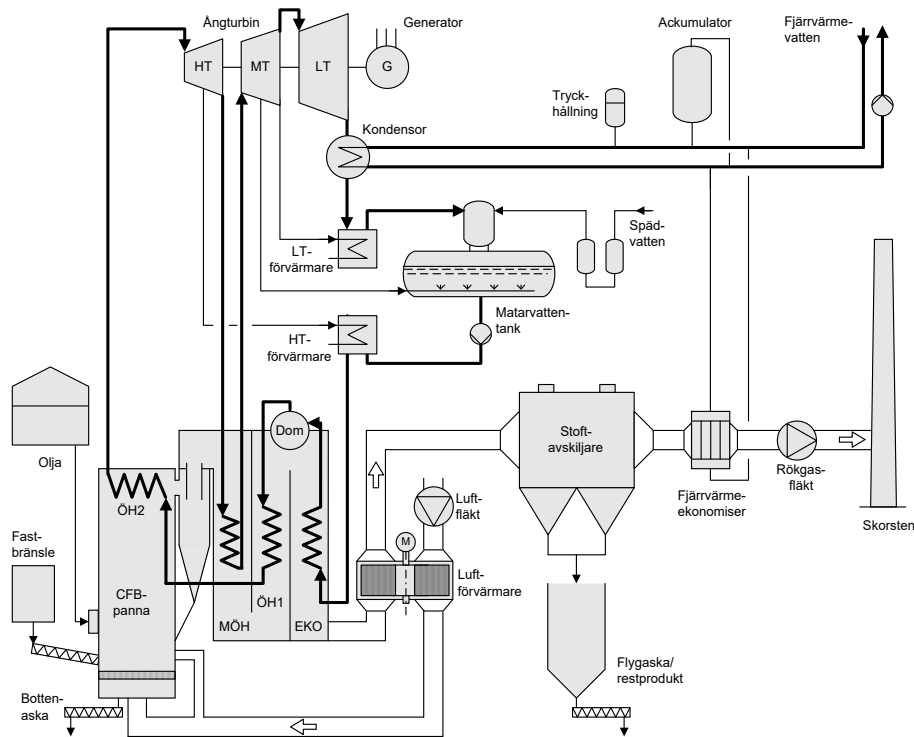


**Figure 1.** Examples of parts and systems in a CFB boiler power station.

The list of content of the second part of the handbook: "Mechanical components", are in principal disposed such as the main titles are different parts of the plant. Subtitles are different systems in a part of the plant and the third level describes components in a system.

The main titles in the second part are:

- 2.1. Boilers
- 2.2. Steam piping
- 2.3. Turbine plant (turbines and generators)
- 2.4. Feed water plant
- 2.5. Auxiliary parts and systems

This division reflexes which parts in the plant that so far have been objects for life time assessment and also have developed methods for this.

The different parts of the plant are given a general description of process, design, critical components and typical materials. Then follow descriptions of damage that may occur and recommended testing as well as methods for determination of the current and assessment of remaining lifetime.

The goal is to describe the links between occurring damage and ageing, relevant testing and possibilities and limitations for lifetime assessments. By the understanding of this it will be facilitated for the plant owner to manage a constructive lifetime work, both for separate components and for the entire plant.

In the general part there are sections that describe damage mechanisms and testing methods that are related to the specific problems that can occur in different components.

The examples in the third part of the handbook cover life time assessments of a boiler and a steam turbine. The study of the boiler was the first systematic life time assessment at this plant. A failure effect analysis was used for selection of critical components. Concepts for a holistic approach for life time assessments was developed and applied. This approach includes in addition to a method for selection of critical components, tailored testing and inspections also a risk based inspection planning, risk based reinvestments and organization of the work. The analysis is a pilot project in this kind which can be illuminating and directive for i) the general planning of the reinvestment needs for an entire plant and ii) the risk based philosophy with regards to safety, environment and economy.

Also the assessment of the steam turbine is a pilot project. In this case a first analysis was carried out 9 years before. The current analysis is the second one and follows the methods that are described in the handbook. The first analysis is described as well. Actions for prolongation of the turbine life time are also described. These actions are based on the results from both analyses. A number of components were classified as critical after the first analysis. After the second one this number of components was significantly reduced.

Together, the three parts in the handbook forms the bases for life time assessments in broader as well as a smaller perspective. In the larger context technical life time, strategies, and sometimes economic analyses are linked together to make it possible to assess the remaining life time.

# Innehåll

|          |                                                                             |           |
|----------|-----------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>0</b> | <b>Inledning</b>                                                            | <b>13</b> |
| 0.1      | Indelning av energianläggningen (identifikationssystem)                     | 15        |
| 0.2      | Tillämpningsområden                                                         | 16        |
| 0.3      | Nomenklatur                                                                 | 16        |
| 0.4      | Handbokens uppläggning                                                      | 17        |
| <b>1</b> | <b>Allmän del</b>                                                           | <b>21</b> |
| 1.1      | Allmänt om kraftvärme- och värmeteknik                                      | 21        |
| 1.1.1    | Dagens anläggningar ur ett tekniskt, ekonomiskt och miljömässigt perspektiv | 21        |
| 1.1.2    | Framtida utveckling                                                         | 24        |
| 1.2      | Design, drift och underhåll som integrerade delar av livslängdsarbetet      | 29        |
| 1.2.1    | Design och designförutsättningar                                            | 29        |
| 1.2.2    | Driftsättets inverkan på livslängden                                        | 30        |
| 1.2.3    | Insamling av data under drift                                               | 31        |
| 1.2.4    | Insamling av data vid incident – skaderapportering                          | 31        |
| 1.2.5    | Koppling mellan underhålls- och livslängdsarbetet                           | 32        |
| 1.2.6    | Uppföljning av ny teknik                                                    | 33        |
| 1.3      | Bedömning av en anläggnings tillstånd och dess återstående livslängd        | 34        |
| 1.3.1    | Nulägesbeskrivning/förstudie                                                | 38        |
| 1.3.2    | Övergripande planering av livslängdsarbetet                                 | 38        |
| 1.3.3    | Detaljerad planering av livslängdsarbetet                                   | 41        |
| 1.3.4    | Genomförande av livslängdsanalysen                                          | 43        |
| 1.3.5    | Konsekvenser av livslängdsanalysen                                          | 56        |
| 1.3.6    | Uppföljning och erfarenhetsåterföring                                       | 57        |
| 1.3.7    | Rapportering                                                                | 58        |
| 1.4      | Strategi och mål för livslängdsanalysen                                     | 61        |
| 1.4.1    | Strategi                                                                    | 61        |
| 1.4.2    | Mål                                                                         | 61        |
| 1.5      | Skademekanismer                                                             | 62        |
| 1.5.1    | Utmattning                                                                  | 62        |
| 1.5.2    | Krypning                                                                    | 78        |
| 1.5.3    | Korrosion                                                                   | 83        |
| 1.5.4    | Miljöinducerad sprickbildning                                               | 96        |
| 1.5.5    | Väterelaterade sprickfenomen                                                | 100       |
| 1.5.6    | Erosion                                                                     | 101       |
| 1.5.7    | Erosionskorrosion                                                           | 106       |
| 1.5.8    | Försprödning                                                                | 110       |
| 1.6      | Oförstörande provning                                                       | 113       |
| 1.6.1    | Magnetpulverprovning                                                        | 114       |

|        |                                                                                                    |     |
|--------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 1.6.2  | Penetrantprovning                                                                                  | 117 |
| 1.6.3  | Ultraljudprovning                                                                                  | 121 |
| 1.6.4  | Virvelströmsprovning                                                                               | 127 |
| 1.6.5  | Skiktjockleksmätning                                                                               | 131 |
| 1.6.6  | Replikprovning                                                                                     | 132 |
| 1.6.7  | Radiografisk provning                                                                              | 137 |
| 1.6.8  | Hårdhetsprovning                                                                                   | 140 |
| 1.6.9  | Kemisk analys                                                                                      | 141 |
| 1.6.10 | Visuell kontroll                                                                                   | 141 |
| 1.6.11 | Läcksökning, Tätkontroll och Tryckprovning                                                         | 143 |
| 1.6.12 | Kvalificering av oförstörande provningssystem                                                      | 144 |
| 1.7    | Förstörande provning                                                                               | 145 |
| 1.7.1  | Uttag av materialprov                                                                              | 145 |
| 1.7.2  | Kemisk analys                                                                                      | 149 |
| 1.7.3  | Metallografisk undersökning                                                                        | 149 |
| 1.7.4  | Dragprovning                                                                                       | 152 |
| 1.7.5  | Slagseghetsprovning                                                                                | 154 |
| 1.7.6  | Brottmekanisk provning                                                                             | 157 |
| 1.7.7  | Krypprovning                                                                                       | 161 |
| 1.7.8  | Hårdhetsprovning                                                                                   | 165 |
| 1.7.9  | Termisk utmattningsprovning                                                                        | 167 |
| 1.8    | Spännings- och brottmekaniska analyser                                                             | 168 |
| 1.8.1  | Spänningsanalyser                                                                                  | 169 |
| 1.8.2  | Brottmekaniska analyser                                                                            | 176 |
| 1.8.3  | Praktiskt exempel: spännings- och skadetålighetsanalys av en komponent med krypsprickor            | 194 |
| 1.9    | Riskbaserade metoder för planering av inspektion och provning                                      | 202 |
| 1.9.1  | Bakgrund                                                                                           | 202 |
| 1.9.2  | Begreppet risk och dess användning för optimering                                                  | 203 |
| 1.9.3  | Orsaker till haveri och driftstopp                                                                 | 204 |
| 1.9.4  | Kvalitativ och kvantitativ riskanalys                                                              | 205 |
| 1.9.5  | Möjligheter och svårigheter med riskbaserad planering                                              | 208 |
| 1.9.6  | Arbetssteg i en RBI-analys                                                                         | 210 |
| 1.9.7  | Bestämning av sannolikhet för komponentfel                                                         | 211 |
| 1.9.8  | Beräkning av konsekvensen då fel inträffar                                                         | 216 |
| 1.9.9  | Riskbaserat urval och optimering                                                                   | 219 |
| 1.9.10 | Återföring av provningsresultat och uppdaterad planering                                           | 223 |
| 1.9.11 | Stöd vid investeringsbeslut – kostnads/nytta-analyser                                              | 224 |
| 1.9.12 | Tillämpningar och praktiska tillvägagångssätt                                                      | 224 |
| 1.9.13 | Exempel: Särskild utredning rörande möjligheter till förlängt driftintervall hos högtryckförmärare | 225 |
| 1.10   | Ekonomi-ekonomisk livslängd                                                                        | 230 |
| 1.10.1 | Ekonomiska strategier                                                                              | 231 |



|          |                                                       |            |
|----------|-------------------------------------------------------|------------|
| 1.10.2   | Ekonomisk livslängd som bas för underhållsarbete      | 231        |
| 1.10.3   | Kostnader för oplanerade stopp och haverier           | 240        |
| 1.10.4   | Kostnader för övervakning och provning                | 241        |
| 1.10.5   | Life cycle cost analyser                              | 244        |
| 1.11     | Praktisk hantering av livslängdsarbete                | 251        |
| 1.11.1   | Mål med livslängdsarbete på system- och komponentnivå | 251        |
| 1.11.2   | Insamling och hantering av information                | 251        |
| 1.11.3   | Upphandling av livslängdsarbete                       | 256        |
| 1.11.4   | Dokumentation och rapportering                        | 257        |
| <b>2</b> | <b>MEKANISKA KOMPONENTER</b>                          | <b>260</b> |
| 2.1      | Pannor                                                | 260        |
| 2.1.1    | Panntyper och ingående system                         | 260        |
| 2.1.2    | Ångdomar                                              | 272        |
| 2.1.3    | Ånglådor                                              | 281        |
| 2.1.4    | Panntuber                                             | 288        |
| 2.1.5    | Överhettare                                           | 301        |
| 2.1.6    | Ekonomisar                                            | 318        |
| 2.1.7    | Luftförvärmare                                        | 321        |
| 2.1.8    | Ång- och hetvattenluftförvärmare                      | 324        |
| 2.1.9    | Fjärrvärmeekonomisar                                  | 325        |
| 2.1.10   | Ångkylare                                             | 328        |
| 2.2      | Ångledningar                                          | 332        |
| 2.2.1    | Allmänt om ångledningar                               | 332        |
| 2.2.2    | Upphängningsanordningar                               | 338        |
| 2.2.3    | Formstycken                                           | 342        |
| 2.2.4    | Ventiler                                              | 351        |
| 2.2.5    | Rörböjar                                              | 353        |
| 2.2.6    | Svetsar                                               | 355        |
| 2.3      | Ångturbiner                                           | 362        |
| 2.3.1    | Allmänna egenskaper                                   | 362        |
| 2.3.2    | Gasturbiner                                           | 397        |
| 2.3.3    | GENERATORER                                           | 426        |
| 2.4      | Matarvattenanläggningar                               | 486        |
| 2.4.1    | Matarvattentankar                                     | 486        |
| 2.4.2    | Avgasare                                              | 498        |
| 2.4.3    | Matarvattenpumpar                                     | 504        |
| 2.4.4    | Matarvattenledningar                                  | 515        |
| 2.5      | Kondensorer                                           | 521        |
| 2.5.1    | Kondensorer                                           | 521        |
| 2.5.2    | Bränslesystem                                         | 531        |
| 2.5.3    | Rökgassystem                                          | 537        |
| 2.5.4    | Askhanteringssystem                                   | 544        |

|                 |                                                       |            |
|-----------------|-------------------------------------------------------|------------|
| 2.5.5           | Värmepumpar                                           | 547        |
| 2.5.6           | Vattenkylare                                          | 557        |
| 2.5.7           | Kompressorer                                          | 566        |
| 2.5.8           | Rökgaskondensering                                    | 571        |
| <b>3</b>        | <b>Exempel</b>                                        | <b>578</b> |
| 3.1             | Livslängdsanalys av en ångturbin i ett kraftvärmeverk | 578        |
| 3.1.1           | Bakgrund                                              | 580        |
| 3.1.2           | Syfte                                                 | 580        |
| 3.1.3           | Avgränsningar                                         | 580        |
| 3.1.4           | Genomförande                                          | 580        |
| 3.1.5           | Metod för Hässelbyanläggningar                        | 581        |
| 3.1.6           | Organisation av arbetet                               | 583        |
| 3.1.7           | Strategi för försöksanläggningar                      | 584        |
| 3.1.8           | Anläggningsdata                                       | 584        |
| 3.1.9           | Förstudie                                             | 586        |
| 3.1.10          | Sammanställning av historic                           | 587        |
| 3.1.11          | Drift- och provningshistorik                          | 588        |
| 3.1.12          | Kritiska komponenter                                  | 590        |
| 3.1.13          | Definition av riskfaktorer                            | 591        |
| 3.1.14          | Provningsplan                                         | 592        |
| 3.1.15          | Riskbaserade inspektioner                             | 594        |
| 3.1.16          | Riskbaserade investeringar                            | 596        |
| 3.1.17          | Investeringsplan                                      | 599        |
| 3.1.18          | Erfarenheter av arbetet                               | 601        |
| 3.1.19          | Slutsatser                                            | 602        |
| 3.2             | Livslängdsanalys av en ångturbin i ett kraftvärmeverk | 612        |
| 3.2.1           | Inledning                                             | 613        |
| 3.2.2           | Metod                                                 | 614        |
| 3.2.3           | ORGANISATION                                          | 621        |
| 3.2.4           | STRATEGI                                              | 621        |
| 3.2.5           | DRIFTHISTORIK                                         | 622        |
| 3.2.6           | KOMPONENTHISTORIK                                     | 623        |
| 3.2.7           | POTENTIELLT KRITISKA KOMPONENTER                      | 624        |
| 3.2.8           | LIVSLÄNGDSBEDÖMNING, EPRI Nivå 2 1992                 | 625        |
| 3.2.9           | LIVSLÄNGDSBEDÖMNING EPRI Nivå 2 2001                  | 637        |
| 3.2.10          | SLUTSATSER                                            | 653        |
| 3.2.11          | GENERELLA ERFARENHETER                                | 653        |
| <b>BILAGA 1</b> | <b>NOMENKLATUR</b>                                    | <b>659</b> |

## 0 Inledning

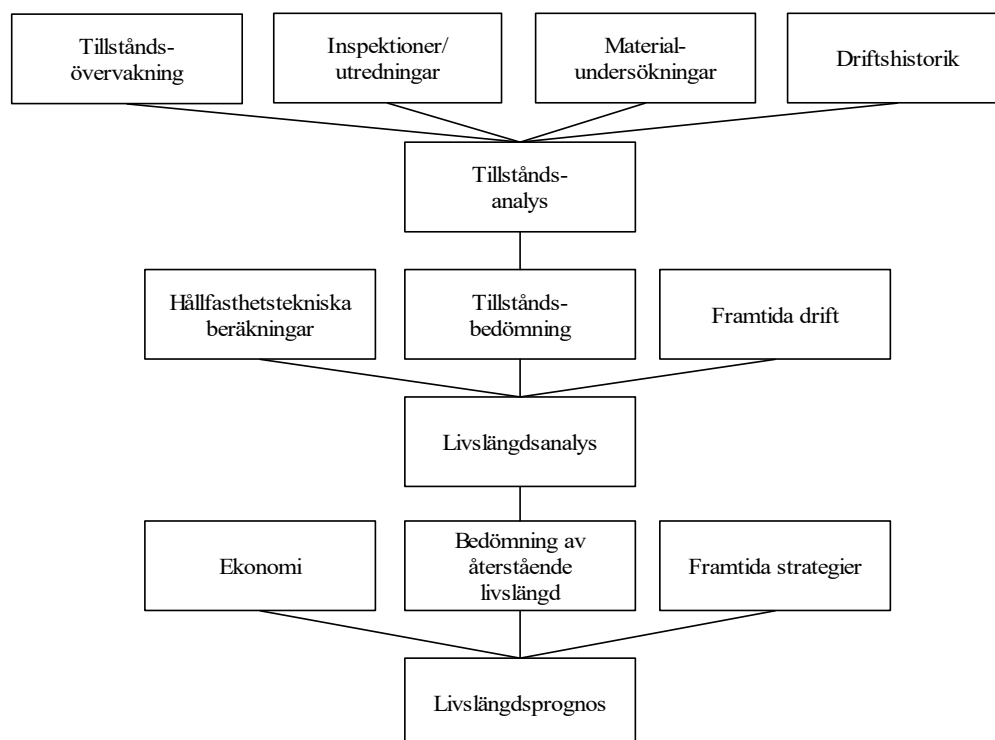
Livslängdsarbete är ett genomgående begrepp i denna handbok. Handboken handlar om vad ett sådant arbete omfattar, hur det genomförs och vilka resultat som kan uppnås.

Grundläggande frågor för en energianläggning i drift rörande dess livslängd är:

- I vilket tillstånd befinner den sig i för närvarande?
- Hur lång återstående livslängd kan förväntas?
- Hur lång återstående livslängd kan behövas?
- Kan den ursprungligen förväntade livslängden förlängas och vilka insatser krävs i så fall för detta?

Livslängdsarbete syftar till att ge svar på dessa frågor.

Figur 0-1 definierar livslängdsarbete med att visa de olika delar som arbetet utgörs av och hur de är kopplade till varandra. Figuren visar linjerna för arbetsordningen samt vad som bör beaktas och utföras, dels för att kunna göra en tillståndsbedömning, och vidare för att kunna nå fram till att göra en livslängdsprognos. Proceduren kan i princip tillämpas för en energianläggning i sin helhet eller för delar av denna.



**Figur 0-1.** Definition av livslängdsarbete i energianläggning.

**Figure 0-1.** Definition of life management in power plant.

I en tillståndsanalys ingår att bestämma vilket underlag som bör och kan ingå i analysen enligt de fyra momenten ovanför tillståndsanalys i figuren. Med tillståndsovervakning i den första av dessa fyra rutor avses kontinuerliga mätningar av olika slag som ett fastställande av en komponents tillstånd kan baseras på. Sedan ingår det att utföra undersökningarna och utvärdera förhållandet mellan resultaten av dessa i tillståndsanalysen. I en tillståndsbedömning värderas sedan tillståndet. Precision och omfattning i denna värdering är avhängig det analyserade underlagets kvalitet, analysens precision, omfattning och resultat.

Materialundersökningar omfattar även jämförelser med konstruktionens materialdata. Drifthistorik i rutan längst till höger omfattar utöver driftdata och driftstörningar även jämförelser med designdata.

Med underlag från tillståndsanalysen kan hållfasthetstekniska beräkningar göras och tillsammans med antaganden om framtida drift och tillståndsbedömningen kan den återstående tekniska livslängden analyseras. Vid en bedömning av den återstående livslängden värderas denna analys med hänsyn till precision, omfattning och resultat.

I en livslängdsprognos ingår utöver bedömning av den återstående livslängden ekonomiska förutsättningar och framtida strategier. Livslängdsprognosen är alltså den övergripande värderingen av anläggningens livslängd, eller delar av denna, där de ekonomiska och strategiska faktorerna viktas in.

Dessa faktorer kan naturligtvis ha en direkt inverkan på livslängdsarbetet i övrigt och på det hela taget är livslängdsarbete ett kontinuerligt arbete som är interaktivt mellan de olika delarna. Återinspektioner, uppföljningar och uppdateringar tillkommer i det fortsatta livslängdsarbetet.

Nya projekteringar och installationer bör utföras med hänsyn till att ett framtida livslängdsarbete ska kunna utföras så rationellt och effektivt som möjligt.

Det finns ett antal metoder och tekniker för att ta fram tillbörlig information för de olika delstegen i livslängdsarbetet som presenteras i Figur 0-1. Handboken belyser vad som är väsentligt i hur man ska gå tillväga, beskriver vanliga metoder och tekniker samt refererar till fördjupningar i litteraturen. Livslängden beror i grund och botten på hur anläggningens komponenter åldras och tar skada. För att nå insikt i detta beskrivs åldringsvillkoren och hur man genom provning och övervakning kan uppskatta åldrande och skadebildning. Dels ges en allmän beskrivning och dels beskrivs tillämpningen på de komponenter som behandlas i handboken. Kunskap om provningsmetoders koppling till skademekanismer har stor betydelse i detta sammanhang.

Livslängdsarbete består till betydande delar av analyser av införskaffat underlag. Delarbeten som ger underlag till att kunna prognosticera livslängden, till exempel uppmätningar av en komponents temperaturpåkänningar, analyseras separat. Den återstående livslängden kan sedan analyseras för en enskild komponent, för delar av en anläggning eller en hel anläggning. Analyser av den återstående livslängden för större delar av en anläggning eller hela anläggningar är förknippat med en komplexitet som kräver väl genomtänkt och organiserad metodik i livslängdsarbetets alla bakomliggande delar för att en relevant prognos ska kunna göras. Handboken behandlar detta med två exempel som i denna utgåva utgörs av (återstående) livslängdsanalyser av en ångpanna och en ångturbin i två olika kraftvärmeverk. I detta exempel tillämpas etablerad metodik för livslängdsarbete som anpassats efter de

rådande förutsättningarna. Exempelen har innovativa inslag där bland annat riskbaserade koncept tillämpas.

**Ekonomi** är en viktig del av livslängdsarbetet och behandlas i ett särskilt kapitel. Optimerad ekonomi är av naturliga skäl en målsättning som är starkt drivande. Relationen mellan livslängdsarbetets omfattning och hur väl ekonomin kan optimeras som ett resultat av livslängdsarbetet är individuell för den enskilda anläggningen. Det finns modeller vars syfte är att optimera den ekonomiska livslängden och kapitlet ger en inblick i vad sådana modeller tar hänsyn till. Riskbaserade metoder för inspektion och underhåll som beskrivs i ett annat kapitel används även de i stor utsträckning för att förbättra lönsamheten.

**Underhåll** är en integrerad del av livslängdsarbetet. Detta gäller särskilt moderna underhållsstrategier och underhållsarbete beskrivs i flera sammanhang i handboken. Det ligger emellertid utanför handbokens ramar att heltäckande redogöra för underhållsarbete i sig.

**Säkerhet och miljö** är centrala begrepp för en energianläggnings drift. Båda aspekterna är väsentliga för en anläggnings överlevnad på längre sikt. Livslängdsarbete påverkas av säkerhets- och miljöfrågor, helt påtagligt genom lagar, förordningar och skatter. Denna påverkan kan även vara omvänd. Ett viktigt led i arbetet med säkerhet och miljö är att ha kännedom om anläggningens kondition och dess återstående livslängd. Vad gäller livslängdsarbete och säkerhetsfrågor kan utvecklingen sägas gå hand i hand. Det kan förväntas att införande av ett mer utvecklat livslängdsarbete kan påverka förordningar så att en högre säkerhet kan erhållas samtidigt som delar i det traditionella säkerhetsarbetet kan reduceras. Därmed kan även en förbättrad ekonomi erhållas genom förbättrad styrning av insatser och resurser. Handbokens kapitel om riskbaserad inspektionsplanering belyser denna utveckling och exemplet på en livslängdsanalys av en panna i del tre är genomfört med sådana ansatser.

Handboken är skriven för anläggningsägaren och dess personal. Syftet är att ge stöd och vägledning i livslängdsarbetet, inte minst vid helhetsbedömningar av en anläggnings tillstånd och återstående livslängd.

Handboken omfattar även till stora delar metodiken vid bedömning av enskilda komponenters utnyttjandegrad. Den lärdom och vägledning som handboken ger om detta förstärker förståelsen och kommunikationen mellan de aktörer som samarbetar i livslängdsarbetets planering och utförande. Sådan kunskap är dessutom nödvändig för att kunna hantera ovan nämnda helheter.

Olika delar av handboken kan vara av primärt intresse för olika läsare. Den är inte främst avsedd att läsas från pärm till pärm men har ambitioner att väcka intresse även för sådant som det inte ursprungligen var avsikten att läsa om. Utöver att kunskap, vägledning och rekommendationer kan inhämtas kan handboken även fungera som inspirationskälla och kanske som en väckarklocka. En spännande uppslagsbok.

## 0.1 INDELNING AV ENERGIANLÄGGNINGEN (IDENTIFIKATIONSSYSTEM)

En energianläggnings uppbyggnad är komplex och en systematisk indelning av denna är väsentlig för att kunna driva och underhålla anläggningen på ett rationellt sätt. Endast i en del av de svenska kraft- och kraftvärmeanläggningarna har en konsekvent indelning gjorts enligt utarbetade system. Ett av de mest kända systemen är det tyska identifikationssystemet KKS (VGB 2010) som används i över 100 kraftanläggningar i

världen varav några i Sverige. KKS är ett exempel på ett indelningssystem som håller en logisk uppbyggnad för att hålla systematisk ordning på anläggningens delar, system, utrustningar och komponenter ned till en detaljerad nivå. Sådana indelningssystem blir omfattande och kan upplevas som alltför komplexa som enda hjälp för att överblicka livslängdsarbetet. En rationell hantering av kontroll, provning, underhåll och livslängdsarbete samt även reparation, ombyggnad och nyinstallation är för den skull inte desto mindre viktig i dagens och morgondagens anläggningar. Om sådant arbete refererar till en konsekvent indelning kan de insatser som gjorts entydigt spåras. Man får en personoberoende överskådlighet och det kan säkerställas att insatser hela tiden görs på rätt ställen. De datorsystem som nu finns tillgängliga, bland annat för riskbaserad utvärdering, kan ge god hjälp till en överblick över anläggningen.

Handboken omfattar inte att analysera utarbetade riktlinjer eller att upprätta nya riktlinjer för en heltäckande indelning av anläggningen. Den indelning av anläggningen som föreligger i handboken förklaras närmare i **avsnittet '0.4 Handbokens uppläggning'** nedan och kan utgöra ett komplement till annan indelning.

## 0.2 TILLÄMPNINGSOMRÅDEN

Innehållet riktar sig i första hand mot kraft-, kraftvärme- och värmeverk med eldning av biobränsle, avfall och fossilt bränsle. Handboken behandlar både de delar av anläggningen som är dimensionerade mot en given livslängd och de delar som inte är det. Vissa kapitel har direkt eller indirekt tillämpning på andra typer av anläggningar inom kärnkrafts-, process och skogsindustri. Det skall understrykas att alla tekniska aspekter som tas upp i handboken måste kontrolleras och, om möjligt, anpassas till andra typer av anläggningar vid eventuell tillämpning på sådana. Detta gäller även petrokemiska anläggningar med kryputsatta system eftersom last, miljö och material i dessa system kan skilja sig väsentligt från de som beaktas i handboken.

## 0.3 NOMENKLATUR

Innebörden av många ord och begrepp tolkas inte sällan olika. Begreppsförvirring kan till exempel orsakas av:

- Oklara och oeniga definitioner
- Branschspecifika definitioner, branschspecifikt språkbruk
- Begrepp som översätts från andra språk

Vad gäller livslängdsarbete i energianläggningar finns det flera begrepp som kan missförstås på grund av punkterna ovan. Flera begrepp på området är också relativt nya och kan ha definitioner som inte är väl etablerade. Vidare förekommer i handboken termer och begrepp som kanske inte är så välkända inom branschen. Det finns därför en nomenklatur i syfte att klargöra vad som i denna handbok avses med ett antal termer och begrepp som är av betydelse för förståelsen av innehållet.

Nomenklaturen ges i alfabetisk ordning i **Bilaga 1**. För kursiverade termer i förklaringarna finns det en separat förklaring i nomenklaturen. De definierade begreppens motsvarigheter på engelska och tyska anges. Referens anges i de fall en definition är tagen från en speciell norm eller standard.

#### 0.4 HANDBOKENS UPPLÄGGNING

Handboken utgörs av tre delar:

- Allmän del
- Mekaniska komponenter
- Exempel

Den allmänna delen ger till en början en beskrivning av kraftvärme- och värmeteknik. Sedan behandlas i olika avsnitt de delar som ingår och har väsentlig betydelse i ett livslängdsarbete. Avsnittens rubriker talar om vad de olika delarna består av:

- Design, drift och underhåll som en integrerad del av livslängdsarbetet
- Bedömning av en anläggnings tillstånd och dess återstående livslängd
- Strategier och mål för livslängdsanalysen
- Skademekanismer
- Oförstörande och förstörande provningsmetoder
- Spännings- och brottmekaniska analyser
- Riskbaserad metodik för planering av inspektion och underhåll
- Ekonomi - ekonomisk livslängd
- Praktisk hantering av livslängdsarbete

Underrubrikerna till dessa avsnitt indikerar vad som är viktigt att beakta eller räknar upp olika metoder eller mekanismer som behandlas. En översikt ges således i innehålls-förteckningen.

Handboken är upplagd så att kraftanläggningens struktur ska kunna överblickas på ett relativt enkelt sätt. Generellt finns tre indelningsnivåer:

1. Anläggningsnivå
2. Systemnivå
3. Komponentnivå

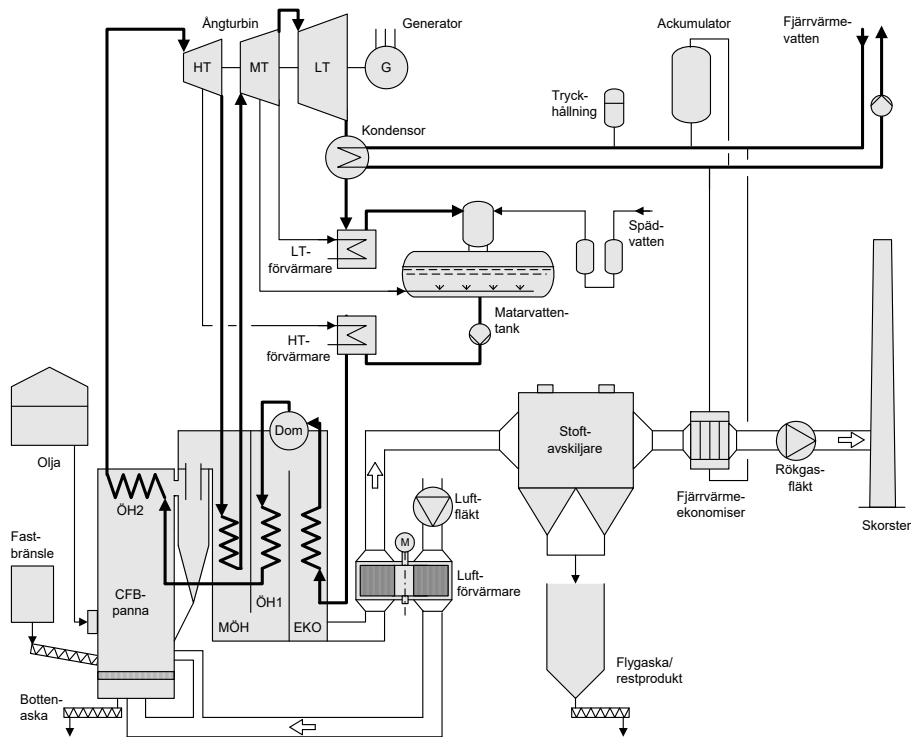
Med dessa nivåer skiljs livslängdsarbete i större och mindre perspektiv. Syftet med livslängdsarbetet samt de ekonomiska och strategiska frågorna i detta kan innebära väsentliga skillnader mellan de olika nivåerna. Detta belyses närmare i kapitel 1.3 "Bedömning av en anläggnings tillstånd och dess återstående livslängd"

De tre nivåerna harmoniserar med de grundläggande indelningsnivåerna i KKS:

1. Anläggning
2. System
3. Utrustning
4. Komponent

Rena definitioner av anläggning och system är dock likartade, se nomenklaturen och vad som kan avgränsa dessa nivåer i praktiken är inte självklart. Ramarna överlappar varandra och många föremål i en energianläggning omtalas odefinierat eller vagt definierat men mer eller mindre väletablerat som en anläggningsdel, ett huvudsystem, ett system eller ett delsystem.

En översikt på viktiga anläggningsdelar och system ges med ett exempel i Figur 0-2.



**Figur 0-2. Exempel på anläggningsdelar och system i ett kraftvärmeverk med CFB panna.**

**Figure 0-2. Examples of parts and systems in a CFB boiler power station.**

Innehållsförteckningen till handbokens del 2 "Mekaniska komponenter", är i princip upplagd så att huvudrubrikerna utgör anläggningsdelar. Under dessa rubriker sorterar system och delsystem samt därunder komponenter.

Vid en närmare granskning kan man dock finna att indelningen ibland inte är strikt med det vanligaste uttrycket för ett föremål. Till exempel, betraktas vanligen pannor (kapitel 2.1) som en anläggningsdel och ångledningar (kapitel 2.2, d.v.s. på samma kapitelnivå som pannor) som ett system.

Begrepp som system och komponent används i handboken i överensstämmelse med definitionerna i nomenklaturen där även besläktade begrepp som till exempel aggregat och tryckbärande anordning finns definierade som jämförelse.

Huvudrubrikerna i del 2 utgörs av:

- 2.1. Pannor
- 2.2. Ångledningar
- 2.3. Turbinanläggningar (turbiner och generatorer)
- 2.4. Matarvattenanläggningar
- 2.5. Övriga anläggningsdelar och system

Denna indelning återspeglar vilka anläggningsdelar som tyngdpunkterna ligger på av det livslängdsarbete som hittills har utförts i kraftvärmeverk i fråga om omfattning, utveckling och konsekvenser av de livslängdsbegränsningar som erfarenheterna har visat.



De olika komponenter som beskrivs för en anläggningsdel eller ett system framgår i innehållsförteckningen i de fall där beskrivningarna är mer omfattande. Anläggningsdelarna ges en allmän beskrivning av funktion, konstruktion, kritiska komponenter och material. Sedan följer beskrivningar av skador, provning och bedömning av återstående livslängd för de komponenter som behandlas. Bedömning av återstående livslängd beskrivs främst för de komponenter där metoder för detta finns utvecklade.

Målsättningen är att kopplingen mellan förekommande skador och åldringsfenomen, relevant provning av detta samt möjligheter och begränsningar till bedömning av återstående livslängd åskådliggörs. Med en sådan förståelse kan ett konstruktivt livslängdsarbete från anläggningsägarens sida underlättas, dels för enskilda komponenter och dels för en uppläggning av livslängdsarbete anpassad till strategier i större perspektiv.

I den allmänna delen finns kapitel som generellt beskriver skademekanismer och provningsmetoder som bakgrund till de specifika problem som kan uppstå i de olika komponenterna. Korsreferenser med kapitlen i del 2 "Mekaniska komponenter", ges. De här kapitlen refererar även till fördjupningar och standarder. Inte minst återfinns referenser till det omfattande arbete som utförts inom området i tidigare Värmeforskningsprojekt. Till livslängdsarbete i större perspektiv och vad som kan genomföras med hänsyn till givna eller möjliga strategier och ekonomiska villkor finns i del 2 grunderna för, och förutsättningarna till, relevanta insatser för att kunna göra en analys av hela anläggningens förväntade livslängd ur teknisk synvinkel.

Exemplen i handbokens tredje del är dels en livslängdsanalys som utförts på en ångpanna och dels på en ångturbin. Studien på ångpannan var den första systematiska insatsen av livslängdsarbete på anläggningen. Med utgångspunkt från en befintlig metod att välja kritiska komponenter, feleffektsanalys, har koncept för ett helhetsbegrepp kring problematiken med livslängdsbedömningar tagits fram och tillämpats. I detta helhetsbegrepp ingår utöver val av kritiska komponenter samt provning och bedömning av dessa även riskbaserad inspektionsplanering, riskbaserade investeringar och organisation av arbetet. Livslängdsanalysen utgör ett pilotprojekt i sin art som kan vara belysande och vägledande för den vidare utvecklingen till att få allt bättre verktyg för i) den övergripande planeringen av investeringsbehovet för en hel anläggning och ii) den riskbaserade filosofin med hänsyn till säkerhet, miljö och ekonomi.

Även livslängdsanalysen av ångturbinen utgör ett pilotprojekt. I det här fallet utfördes en första livslängdsanalys 9 år tidigare. Den nu senast utförda analysen är den andra i ordningen och den följer metodik som finns beskriven i handbokens första del. Även den första livslängdsanalysen är utförd i linje med den andra och den finns också redovisad. I kapitlet redovisas också livslängdsförlängande åtgärder som utförts på bas av och i samband med de båda livslängdsanalyserna. Det har resulterat i att antalet kritiska komponenter i turbinen som visade sig vara ganska många i den första livslängdsanalysen väsentligt har kunnat minskas i den andra.

Tillsammans utgör de tre delarna i denna handbok grunder för livslängdsarbete i både större och mindre perspektiv. I det större perspektivet sammanfogas teknisk livslängd, strategier och i viss mån ekonomisk analys för att skapa relevanta beslutsunderlag och för att kunna göra en bedömning av anläggningens återstående livslängd.

## REFERENS

Guidelines KKS Identification System for Power Stations, VGB B 105e, 6th edition, 2010.

# 1 Allmän del

## 1.1 ALLMÄNT OM KRAFTVÄRME- OCH VÄRMETEKNIK

### 1.1.1 Dagens anläggningar ur ett tekniskt, ekonomiskt och miljömässigt perspektiv

#### 1.1.1.1 *Det svenska anläggningsbeståndet*

Det finns ingen heltäckande kartläggning av det svenska beståndet av anläggningar för kraft- och värmeproduktion. De anläggningar som innefattas i hela beståndet är kärnkraftverk, värmepumpar, vattenkraft, förbränningsanläggningar för värme- och kraftproduktion, gasturbiner, vindkraftverk, dieselmotorer, m.m. En delmängd av detta, det svenska pannbeståndet, kartlades 1993 av NUTEK (NUTEK 1994). Undersökningen var förknippad till potentialen för användning av biobränslen vilket medförde att det endast var pannor som kartlades.

I den kartläggning som NUTEK genomförde 1993 redovisas alla typer av pannor med en effekt större än 10 MW. I kartläggningen behandlades såväl hetvattenpannor som ångpannor. Den totala installerade effekten var ungefär 30 000 MW. Ungefär 20 000 MW (421 pannor) var installerade vid värmeverk. Ungefär 6 000 MW (159 pannor) fanns installerade vid industriföretag resterande 3 000 MW (82 pannor) var installerade inom övriga näringsgrenar.

Naturvårdsverket gjorde 2005 en uppskattning av det svenska pannbeståndet utifrån olika källor. Drygt 500 pannor uppskattades vara större än 10 MW, av vilka ett trettiotal fanns i spannet 100-200 MW. Endast ett fåtal pannor hade en högre effekt än 200 MW.

Av NOx-registret framgick att ca 250 pannor hade en årlig energiproduktion överstigande 25 GWh. Antalet industripannor kunde inte uppskattas annat än att antalet med en årlig energiproduktion överstigande 25 GWh var ca 160 stycken. Därtill kommer sodapannorna vilka uppskattades vara ett 40-tal.

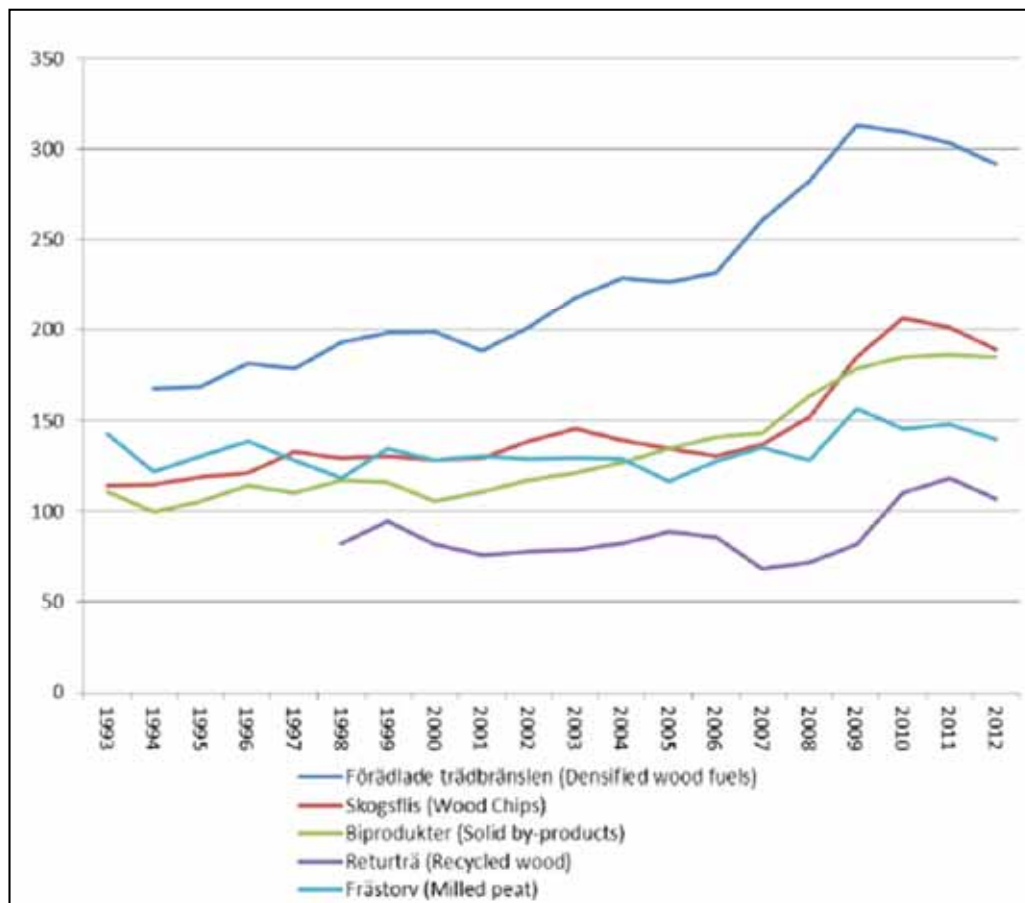
I perioden 1993 och 2005 byggdes ett flera nya kraftvärmeverk, varav många var avfallsförbränningsanläggningar. Avfallsförbränningspannor ingår dock inte i Naturvårdsverkets sammanställning. Det totala antalet pannor över 10 MW var mindre 2005 jämfört med NUTEKs bedömning 1993. Om man bortser från soda- och avfallsförbränningspannor tyder det på att fler pannor har tagits ur i drift än vad som har byggts nya under perioden.

#### 1.1.1.2 *Bränslen*

Bränsleanvändningen i svenska kraftvärme- och värmeanläggningar har varierat med åren. Under början av 1900-talet användes kol som bränsle för uppvärmning. Under perioden 1950 till 1974 ökade oljeanvändningen i omfattning, detta då oljan betraktades som ett lätthanterligt och billigt bränsle. I och med oljekrisen började intresset för alternativ till oljan att studeras. Under slutet av 1970-talet och första åren av 1980-talet ansågs det viktigt att bryta oljeberoendet, varför intresset för kol återväcktes. Kolet betraktades vid denna tidpunkt som ett bränsle med hög tillgänglighet på världsmarknaden med många leverantörer och en väl utvecklad världshandel. I början av 1980-talet ändrades inställningen till kol och politiskt ansågs det viktigt att prioritera inhemska bränslen. Under inledningen av 1980-talet ansågs det föreligga risk för en brist av skogsråvara till skogsindustrin. Till följd av detta skyddades skogsråvaran från

att användas som bränsle under en tid och torv blev i första hand det inhemska bränsle som skulle användas. Därefter har emellertid bränslen från skogen använts i allt större omfattning för energiproduktion. Under början av 1980-talet insåg många anläggningsägare vikten av bränsleflexibla anläggningar som följd av snabba förändringar i attityden till olika bränslen. Detta gjorde att den cirkulerande och bubblande fluidbädden kom att introduceras i Sverige. Fluidbädden ansågs vara bränsleflexibel och ha goda miljöprestanda.

I löpande priser förändrades inte priset för skogsbränslen mellan 1985 och 1997. Om hänsyn tas till konsumentprisindex betyder detta en prissänkning på skogsbränslen för perioden. Orsakerna till denna utveckling var dels att en fungerande skogsbränsle-marknad byggdes upp och dels att mindre värdefulla fraktioner användes som bränslen, t.ex. GROT (grenar och toppar) samt stubbar. Sedan i början av 2000-talet har dock priserna börjat öka. Det gäller främst de förädlade bränslena och biprodukter. På senare år har även priserna för skogsflis, RT (retur trä) och frästortv ökat, se Figur 1.1-1.



Figur 1.1-1. Prisutveckling för trädbränsle- och torv, kronor/MWh [Energimyndigheten 2013].

Figure 1.1-1. Price development for wood fuel and peat, crowns/MWh [Swedish Energy Agency].

En viktig trend under senare delen av 1990-talet när det gäller produktion av bränslen är bränsleförädlingen och utvecklingen mot torrare bränslen. De förädlade bränslena, t.ex. bränslepellets, ger högre energiinnehåll och är mer lönsamma att transportera än oförädlade. Dessutom ger de bättre förbränning och därmed mindre skadliga utsläpp.

Fram till 2010-talet har andelen biobränsle ökat radikalt. Utöver trädbränslen förekommer jordbruksprodukter, animaliska produkter och torv. Avfallsprodukter vanligt förekommande, t.ex. hushållsavfall, plast och returträ. Om bränslet i huvudsak är avfallsprodukter eldas de i avfallsförbränningsanläggningar eller samförbränningsanläggningar. Många bio- och avfallsbränslen är korrosiva och beläggningbildande. Samförbränning, dvs. en blandning av olika bränsletyper, möjliggör reducerade korrosions- och beläggningsproblem jämfört med ensidiga val av bränsle.

#### *1.1.1.3 Skatter och miljöavgifter*

Sedan 1950-talet har energianvändningen i Sverige varit beskattad. Syftet med energiskatterna har varierat med tiden. Då skatterna infördes motiverades dessa av statens behov av att finansiera offentlig verksamhet. Senare har dock behovet av att styra energianvändningen i landet för att uppnå energi- och miljöpolitiska mål kommit att motivera skatter inom energisektorn.

Under senare delen av 1980-talet riktades intresset allt mer mot miljöfrågor såsom utsläpp av svavel, kväveoxider och koldioxid. Under 1991 infördes koldioxidskatt och svavelskatt. Koldioxidskatten belastar inte biobränslen som i detta sammanhang betraktas som koldioxidneutrala. Ur skattesynpunkt betraktas torven som ett biobränsle då den inte belastas med koldioxidskatt. Under 1992 infördes en miljöavgift på kväveoxider. År 2013 avskaffades koldioxidskatten för kraftvärmeverk.

EU:s system för handel med utsläppsrätter inleddes 2005 och omfattar ca 13 000 anläggningar. Handel med utsläppsrätter är ett verktyg för att nå EU:s åtagande om minskade utsläpp av växthusgaser enligt Kyotoprotokollet. Koldioxid är den huvudsakliga växthusgasen som ingår i EU:s handelssystem för utsläppsrätter. 1 januari 2013 inleddes en tredje handelsperiod som löper till år 2020. Priset för utsläppsrätter har på senare år blivit lågt och incitamentet för de företag som omfattas av systemet har därmed minskat.

#### *1.1.1.4 Statliga stöd för byggande av anläggningar*

Flertalet av de nyare fastbränsleanläggningar som byggts under 1980 och 1990-talen, är byggda med delvis statligt stöd. Under 1983 infördes det så kallade torvstödet. Syftet med stödet var att skapa förutsättningar för torvleverantörerna att leverera torv samt att minska oljeberoendet. Som följd av stödet byggdes ett femtiotal anläggningar av varierande storlek. De anläggningar som byggdes med detta stöd var främst hetvattenanläggningar. De flesta anläggningarna är fortfarande i drift.

Under 1991 tillkom det så kallade kraftvärmestödet för att främja elproduktion från biobränslen. Detta stöd ledde till byggandet av ca 45 anläggningar för produktion av el. De anläggningar som byggdes med detta stöd var av varierande typ såsom gasmotorer för deponi- och rötgas, avfallsförbränning samt biobränslebaserad kraftvärme.

Under 1997 infördes ett nytt stöd för att stimulera byggandet av biobränslebaserade kraftvärmeverk. Även i framtiden kan det förväntas att det kommer att skapas olika former av statliga stöd för att främja tillkomsten av nya anläggningar för omvandling av förnyelsebar energi.

De generella statliga stöden för uppförandet av anläggningar har endast i begränsad omfattning medfört introduktion av ny teknik på marknaden. Detta bortsett från

torvstödet som bidrog till introduktionen av fluidbäddtekniken i större omfattning i Sverige.

Systemet med Elcertifikat infördes 2003 för att öka andelen förnyelsebar elproduktion till år 2016 med 17 TWh. År 2006 gjordes en förändring av elcertifikatsystemet som innebar att det förlängs till och med 2030. Delmålet är att till år 2020 skapa 25 TWh förnyelsebar el jämfört med 2002 års nivå. Från år 2002 fram till år 2011 har den förnybara elproduktionen ökat med drygt 13 TWh, framför allt genom ny biokraft och vindkraft.

### 1.1.2 Framtida utveckling

Hittills har de kraftvärmeanläggningar som byggts huvudsakligen varit konventionella förbränningsanläggningar. I framtiden kan man förvänta sig att även andra tekniker kommer att utvecklas och byggas för kraft eller värmeproduktion såsom vindkraftverk, bränsleceller, förgasnings- och pyrolysanläggningar, stirlingmotorer, m.fl.

Utvecklingen inom kraftvärme- och värmeteknik sker inom områden såsom materialteknik, förgasningsteknik, pyrolysis, katalytisk förbränning, katalytisk rökgasrening, nya termiska processer, pulvereldade gasturbiner och pulvereldade dieselmotorer etc. Detta i syfte att skapa termiskt effektivare anläggningar med bättre miljöprestanda. Försök i pilotanläggningar med förgasning av avfall och biomassa pågår i både Europa och USA samt i Japan.

Miljöfrågorna har påskyndat introduktionen av ny teknik som t.ex. rökgaskondensering och användning av selektiv icke-katalytisk reduktionsteknik (SNCR) för reducering av NO<sub>x</sub> samt selektiv katalytisk reduktionsteknik (SCR) som inte minst är effektivt för reducering av dioxiner. Sannolikt kommer det att ske en fortsatt teknisk utveckling som är grundad på framtida miljökrav och miljömål.

Då nya tekniker kommersialiseras uppstår alltid nya problem vad gäller underhåll och livslängd. Efter det att problemen uppmärksammas utvecklas tekniken och barnsjukdomarna elimineras. De problem som uppstår är ofta svåra att förutsäga. De omfattande korrosions- och beläggningsproblem som uppstod efter att användningen av bio- och avfallsbränslen tog fart på 1990-talet har ännu inte eliminerats. Genom forskning har man erhållit kunskap som har medfört att korrosion och beläggningar har kunnat reduceras till mer acceptabla nivåer.

Att för enskilda tekniker peka på var problem kommer att uppstå är näst intill omöjligt. Ur ett livslängdsperspektiv är det extra viktigt att följa upp nya typer av anläggningar för att bygga upp kunskap och för att systematiskt förbättra konstruktionerna. För den enskilda anläggningsägaren kan detta innebära extra kontroller och uppföljning av haverier och driftsstörningar. Detta arbete bör ske i samarbete med leverantören för att så långt det är möjligt avhjälpa fel i den befintliga anläggningen. Hänsyn till detta bör tas redan vid upphandlingen då anläggningar med ny relativt okänd teknik projekteras.

#### 1.1.2.1 Miljö

Miljöfrågor och då speciellt koldioxidfrågan är och kommer att vara viktiga i framtiden. Denna utveckling **har lett** till byggande av fler biobränslebaserade kraftvärmeverk i Sverige eftersom biobränslen betraktas som koldioxidneutrala. Vindkraft har under senare år ökat väsentligt för att 2014 stå för 4,5 % av elproduktionen och målet för 2020 är 20 %. Olika typer av anläggningar belastar miljön

på olika sätt, varför det alltid kommer att finnas en diskussion om olika anläggningars miljöbelastning i en vidare mening än bara emissioner av olika slag. Andra miljöaspekter på anläggningar kan vara lokalisering, utseende, m.m. Flera avfallsförbränningsanläggningar har byggts på senare tid som ett alternativ till deponi. Avfallsförbränning tillsammans med materialåteranvändning och förbud mot deponi av organiskt material 2005 (samt punktskatt på övrigt material) har lett till en mycket stor minskning av deponerad avfallsmängd. Miljöaspekterna är komplexa och kommer att kräva allt mer vid planering av anläggningar i framtiden.

#### 1.1.2.2 Rökgasrening

Rökgasreningstekniken har utvecklats genom åren och sker idag i flera steg, vanligen med ett urval av följande tekniker: cyklon, elfilter, textila spärrfilter, rökaskondensering, insprutning av urea/ammoniak, SCR/SNCR, rökgasavsvavling, insprutning av släckt kalk (neutraliserar sura ämnen), aktiv kol (binder dioxiner). I NUTEKs kartläggning av svenska pannanläggningar redovisas aktuell rökgasreningsutrustning i befintliga anläggningar. Ungefär hälften av befintliga svenska anläggningar var 1993 utrustade med stoftavskiljare. Den vanligaste typen av stoftavskiljare var cyklonfilter. Ungefär 5 % av anläggningarna var utrustade med någon typ av utrustning för NO<sub>x</sub>. Ca 5 % av pannorna var utrustade med svavelreduktions-utrustning. I dag kan rökgasreningen stå för upp till halva kostnaden vid projektering av en ny avfallsförbränningsanläggning. Sådana har mycket stränga krav på förbränningsbetingelser och reningsteknik. Även biobränsleeldade anläggningar byggda under senare tid har avancerad rökgasrening i flera steg.

#### 1.1.2.3 Ångdata och material

Dagens svenska kraftvärmeverk har relativt begränsade ångdata vid en internationell jämförelse. Utvecklingen av ångdata för kolanläggningar har på 30 år gått från en internationell standard med ångtryck på 160 bar och ångtemperaturer på ca 540°C omkring 1978 till ångtryck och -temperaturer på över 300 bar respektive 600°C. Denna utveckling har medfört en höjning av elverkningsgraden från ca 38 % till ca 46 % på 30 år.

Inom materialtekniken är utvecklingsarbetet inriktat på att finna nya material för högttemperaturapplikationer. Temperaturtåligare material leder till möjligheter att uppnå högre ångtemperatur och högre ångtryck vilket medför prestandahöjningar. Introduktion av nya varmhållfasta 9-12% Cr-stål tillåter ångdata på omkring 300 bar och 600°C. I den materialutveckling som sker idag är målet 350 bar och temperaturer upp till 650°C för ferritiska stål. Med dessa ångdata skulle kolpulveranläggningar kunna nå elverkningsgrader på ca 50 %. Ännu högre ångdata kan nås med nickelbaslegeringar och målsättningen där är 750°C. Denna materialutveckling gäller alltså koleldade anläggningar. I Sverige är bio- och avfallsbränsle dominerande. I dessa anläggningar är det inte materialets kryphållfasthet som sätter gränserna. Det är istället korrosionsegenskaperna som har störst betydelse. Värmeforsk, KME och HTC har som gemensamt mål att uppnå ångtemperaturen 600°C för biobränsleanläggningar. För returträ och avfallsförbränning är motsvarande mål 550°C respektive 500°C.

Ur ett livslängdsperspektiv är nyutvecklade material inte alltid välkända. Då nya material introduceras på marknaden och kommer till användning bör detta, liksom då andra nya tekniker kommer till användning, medföra systematisk uppföljning för att få möjligheter att bedöma materialet långsiktigt. Detta arbete bör ske i samarbete med leverantören. Detta för att minska eller eliminera riskerna för problem i efterföljande



anläggningar. Ett exempel är nya låglegerade stål med förhöjd hållfasthet som har framför allt har utvecklats för att användas till eldstadstuber i nya koleldade högprestandaanläggningar. Konventionella material har inte tillräcklig hållfasthet för att klara det höga tryck som råder i dessa anläggningar. I drift har dock de nya materialen visat sig ha stora sprickproblem. Stora forskningsinsatser pågår för att förstå rådande skademekanismer i detalj för att möjliggöra åtgärder av problemen.

#### 1.1.2.4 Nya omvandlingstekniker

Nya omvandlingstekniker har utvecklats och kommer att utvecklas parallellt med att etablerade tekniker vidareutvecklas. Under 1980-talet blev fluidbäddtekniken kommersiell. Tekniken motiverades av flexibilitet vad gäller bränsle och goda miljöprestanda. Sverige har kommit att bli ett av de länder i världen som har de flesta fluidbäddpannorna installerade per capita. I början brottades leverantörerna och beställarna av anläggningarna med stora problem vad gäller tillgänglighet och underhåll på enskilda komponenter. Bland problem som kan nämnas fanns erosion, sprickbildning och kollaps av murbruk och stampmassor som följd av olyckliga materialval, korrosion, etc. Dessa problem har åtgärdats allt eftersom leverantörer och beställare fått förståelse för problemen och lärt sig att hantera dem.

De nya omvandlingsteknikerna, som kan förväntas introduceras på marknaden, kommer sannolikt i inledningsskedet att drabbas av barnsjukdomar. De termiska tekniker, som står närmast på tur för demonstration, är förgasning och pyrolys.

När det gäller förgasningsteknik finns i dag, dels en utveckling av småskaliga anläggningar på något hundratal kW, dels den storskaliga förgasningen.

Den första och hittills enda demonstrationsanläggningen i full skala är kraftvärmeverket i Lahtis i Finland. Hushålls- och industriavfall samt returträ förgasas i en CFB förgasare. Förgasningen sker vid 850-900°C. Sedan kyls de utvunna gaserna ned till 400°C där korrosiva ämnen kondenserar. Gasen filtreras och förbränns sedan i en efterföljande avgaspanna vid 540°C och 121 bar. Anläggningen ger 90 MW värme och 60 MW el. Andelen el av den totala energiproduktionen är betydligt större än hos konventionell kraftvärme, vilket ökar lönsamheten.



De projekt som har kommit längst i övrigt är:

- EU-projektet *Bio-SNG*. Framställning av metan som drivmedel via förgasning av träflis har demonstrerats i Güssing, Österrike. Anläggningen är baserad på indirekt förgasningsteknik. Förgasaren är på 8 MW<sub>th</sub> medan metanisering-senheten har en kapacitet på 1 MW. I direkt anslutning till anläggningen har en tankstation för metan byggts. Den invigdes den 24 juni 2009 och har sedan dess körts med ca 7000 drifttimmar per år.
- Inom GoBiGas-projektet planeras det för en anläggning i industriell skala i Göteborg. I en första etapp togs en anläggning på 20 MW, baserad på indirekt förgasning, i drift 2013. I en andra etapp planeras ytterligare en anläggning på 80 MW.

Pyrolys eller torrdestillation innebär termisk sönderdelning av material på molekylär/atomär nivå i antingen syrefri atmosfär eller med så låg syrehalt att de reaktioner, som karakteriserar förgasning, inte kan iakttas. Pyrolysvätskan är en lättflyktig och reaktiv produkt. Pyrolys är inte på något sätt nytt utan användes tidigare vid tjärutvinning. Efter att pyrolysen bedömdes som olönsam under 1980-talet har intresset varit begränsat. Under 1990-talet har dock intresset stigit som följd av strömningar inom samhällstrukturen som förespråkar återanvändning – kretslopp. Tekniken har utvecklats under lång tid utan att nå större framgång. Insatser har gjorts under 1990-talet för att introducera pyrolysen i Sverige. I de flesta fallen har det handlat om att pyrolysera ett avfall såsom gummi eller sopor. Försök har också gjorts att introducera pyrolys av biobränslen. Ett projekt som syftar till att kunna tillverka grön olja av skogsrester genom pyrolys pågår för närvarande i regi av EU programmet NER300. I framtiden kan pyrolysanläggningar även komma att motiveras av andra skäl än förädling till energiprodukter. De produkter som erhålls ur pyrolysanläggningar kan delvis användas som råvaror i kemiska processer.

Katalytisk förbränning innebär att förbränningen sker i nära kontakt med en yta av ett material som inte deltar i oxidationen av bränslet men påverkar den och påverkar olika reaktioner positivt för att minska miljöbelastningen. Katalytisk förbränning kommer förmodligen att först bli aktuellt i mobila tillämpningar.

#### 1.1.2.5 Nya termiska processer

Exempel på nya termiska processer som är under utveckling är Kalina-cykeln och HAT-cykeln.

Kalina-cykeln är en kraftcykel som använder ammoniak-vattenblandningar som arbetsmedium istället för rent vatten. Fördelen med en blandning av ammoniak och vatten är att den kokar och kondenserar med en stigande respektive sjunkande temperatur. Detta medför en möjlighet att förbättra många av värmeväxlingarna som sker i en kraftanläggning. Kalina-cykeln presenterades första gången 1983. Cykeln har många tillämpningsområden, men gjorda studier visar att den framförallt passar bra vid lite lägre temperaturer på värmekällan. Exempel på intressanta användningsområden är som botten-cykel efter en gasturbin eller kraftcykel med spillvärme eller geotermisk värme som värmekälla. Idag finns det en demonstrationsanläggning i USA och flera företag arbetar med att kommersialisera cykeln. En studie visar att elverkningsgraden för en botten-cykel efter en gasturbin ligger på 39 % (Smith 1996). En nackdel med Kalina-cykeln är att man behöver system för att förhindra och mildra utsläpp av ammoniak från anläggningen. Ännu är antalet anläggningar i drift begränsat till ett fåtal.

HAT-cykeln är en evaporativ gasturbinprocess där HAT står för Humid Air Turbine d.v.s. förbränningsluften uppfuktas. Fukten tillförs den komprimerade luften i ett uppfuktningstorn. Tack vare den evaporativa metoden för vattentillsättning möjliggörs värmeåtervinning vid en lägre temperatur än i torr luft. Det går dessutom att utnyttja värmen vid mellankylning av kompressionen. Huvudkomponenterna i den evaporativa gasturbincykeln är uppfuktningstorn, mellankylare och rekuperator.

Sedan 1989 har ett flertal internationella studier gjorts som behandlar optimering och prestanda av HAT-cykeln. Macchi et. al. har jämfört HAT-cykeln med andra avancerade gasturbincykler. De har också jämfört ett antal olika publikationer om HAT-cykeln (Macchi 1994). Resultaten av de systemstudier som har gjorts visar att den termiska verkningsgraden varierar mellan 53-59 % för HAT-cykeln. I flera studier har jämförelser med kombicykler gjorts. Dessa studier påvisar att HAT-cykeln har samma eller bättre verkningsgrad än kombicykeln. En pilotanläggning har också byggts vid Lunds Tekniska Högskola. I Japan togs en 40 MW pilotanläggning i drift 2011.

#### REFERENSER

- Macchi E., Consonni S., Lozza G. & Chiesesa P. 1994. An assessment of the thermodynamic performance of mixed gas-steam cycles; part B water-injected and HAT-cycle, ASME 94-GT-424, The International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exposition, The Hague, Netherlands, June 13-16
- NUTEKs pannregister, Info 1990-1994
- Smith R. W., Ranasinghe J., States D. & Dykas S. 1996. Kalina combined cycle performance and operability, PWR-Vol 30, Joint Power Generation Conference, Volume 2, ASME
- Naturvårdsverket branschfakta: Förbränningsanläggningar för energiproduktion (utom avfalls- förbränning) – Utgåva 2, 2005

## 1.2 DESIGN, DRIFT OCH UNDERHÅLL SOM INTEGRERADE DELAR AV LIVSLÄNGDSARBETET

Kraftvärme- och värmeanläggningar är i många avseende unika, då de omvandlar energi kontinuerligt dag efter dag beroende på aktuellt behov, utan eller med begränsade möjligheter att lagra den omvandlade energin. Nätverket bestående av produktions-, transmissions- och distributionsutrustning måste ha en hög tillgänglighet. Då nya anläggningar planeras för såväl ny kapacitet som utbyte av gammal utrustning är ledtiderna från planeringsstart till färdig produktionsanläggning långa. Ledtiderna är beroende av ett stort antal parametrar såsom tillstånd, byggtider, m.m. Som en följd av detta är det nödvändigt för industrin att planera för ny utrustning flera år i förväg för att kunna säkerställa framtida leverans av kraft. Det medför också att livslängdsarbetet är viktigt för att planera utbyte av uttjänta anläggningsdelar och komponenter.

### 1.2.1 Design och designförutsättningar

Det framtida underhållsarbetet, livslängdsarbetet och livslängden i en anläggning kan påverkas redan på designstadiet. Det är därför av stor vikt att som beställare ställa krav på utformning av anläggningens design samt att fastställa de förutsättningar som skall gälla för anläggningen. Införandet av tryckutrustningsdirektivet (PED) i maj 2002 medför högre krav på beställare att specificera sin upphandling än tidigare. Det är därför viktigt även för anläggningsägaren att vara insatt i gällande regler rörande tryckbärande anordningar.

Exempel på viktiga förutsättningar vid design av anläggningar är:

- Tänka driftförhållanden.
- Typer av bränslen som kan vara aktuella.
- Utrymme för underhåll.
- Utrymme för och möjligheter till inspektioner.

Vid design av anläggningar är det viktigt att hänsyn tas till de driftsförhållanden anläggningen skall arbeta under. Ett exempel på driftsförhållanden som måste beaktas är om anläggningen är avsedd för lastväxlingar och spetslaster eller endast för kontinuerlig drift med baslast. Andra driftsförhållanden som bör beaktas är om stora och snabba lastvariationer kommer att förekomma. Hur flexibel ska anläggningen vara med avseende på driftförhållanden under sin designlivslängd? Denna typ av uppgifter kan påverka dimensioneringen av tryckbärande delar, vilket i sin tur påverkar anläggningens återstående livslängd.

Valet av bränsle är en väsentlig designparameter. Till exempel har odlade bränslen oftast en högre alkalihalt än andra biobränslen vilket tillsammans med klor kan leda till betydande högtemperaturkorrosion eller beläggningar i överhettare och eldstad. Även slitage i transportörer och roster är bränsleberoende. Risken för sådana effekter av bränslet kan minskas om det medvetandegörs redan vid designstadiet.

Vid dimensionering av anläggningens tryckbärande delar med avseende på hållfasthet används normalt metoder och rekommendationer i gällande normer som baseras på klassisk linjär elasticitetsteori. Det snitt i konstruktionen som har den högsta påkänningen är dimensionerade för godstjockleken. Utmattningsberäkningar görs endast i begränsad omfattning. Miljöinducerad sprickbildning beaktas inte heller alltid på designstadiet. Kriterier för dimensioneringen beskrivs närmare i **kapitel 1.3.4.3**

**Kriterier för livslängdsanalyser.** Vad gäller generell design för hållfastheten hänvisas även till **kapitel 1.8 Spännings och brottmekaniska analyser.**

Designfrågor som kan påverka underhålls- och livslängdsarbetet är ofta specifika för olika komponenter. Generellt gäller att det endast är på designstadiet som det är möjligt att skapa tillräckligt med utrymme i en anläggning för ett effektivt framtida underhålls- och livslängdsarbete.

Hänsyn bör till exempel tas till att:

- Underhållspersonalen måste ha utrymme för att lätt kunna demontera anläggningens största utbytbara del.
- Det finns tillräckligt med manluckor så att alla utrymmen kan inspekteras enkelt;
- Manluckor och trappor måste vara tillräckligt stora så att utbytta komponenter kan tas ut och förflyttas.
- Nödvändiga inspektionsmöjligheter såsom hål för endoskopiundersökningar planeras och tillverkas redan till leverans av anläggningen.
- Kranar och traverser avsedda för att underlätta underhållet tas med på designstadiet istället för att kompletteringar görs i efterhand.

Denna typ av överväganden på designstadiet underlättar och minskar kostnaderna avsevärt för det framtida underhållet, livslängdsarbetet, driften och den totala investeringskostnaden.

De flesta komponenter som ingår i en anläggning omfattas av ett underhållsprogram framtaget av leverantören. Det är viktigt för underhållsarbetet att redan på designstadiet specificera och göra en dokumentation av anläggningen. Dokumentationen bör vara väl genomtänkt och innehålla beskrivningar över hur utrustning demonteras och monteras. Formen för dokumentation är också väsentlig. Dokumentation kan lagras i form av papperskopior eller i digital form. Digital lagring är idag vanligast. Även äldre dokument skannas in och lagras digitalt. Detta ställer krav på möjligheter till konvertering mellan filformat och media under en anläggnings livslängd.

Sammanfattningsvis bör följande beaktas vid beställning av en anläggning:

- Utformning av anläggningen med hänsyn till underhålls- och livslängdsarbetet.
- Inverkan på drift och livslängd av de olika bränsletyper som avses användas.
- Val av dokumentationssystem för design- och driftsdata.
- Driftsförhållanden och hur dessa kommer att påverka livslängden.

### 1.2.2 Driftsättets inverkan på livslängden

Driftsättet för en anläggning har väsentlig betydelse för en anläggnings livslängd. En anläggning som designats som en baslastanläggning kan vid ett senare skede komma att användas som spetslastanläggning. Vid denna förändring av driftsbetingelser kan anläggningen komma att utsättas för andra belastningar än vad som var tänkt på designstadiet. De transienta fenomen som uppträder vid start och stopp kan då leda till termisk eller termomekanisk utmattning samt miljöinducerad sprickbildning och en reducerad livslängd.

Ett exempel på åtgärd för turbiner vid en sådan förändring är att minska belastningen genom mer skonsamma startförlopp. Genom förvärmning och en kontrollerad upprullning av turbinen kan temperaturtransienter avsevärt minskas. För

livslängdsanalyser av turbiner är övervakning, dokumentation och uppföljningar av förloppen vid starter och stopp samt laständringar viktiga indata.

### 1.2.3 Insamling av data under drift

Väl dokumenterade dimensioneringsberäkningar, materialprover kompletterade med kontinuerlig registrering av driftsdata och kontrollerad styrning av driften utgör den bästa grunden för såväl tillståndsbedömningar som livslängdsanalyser och livslängdsprognoser. Olika datasystem kan vara till hjälp för insamling av driftsdata. Allteftersom kostnaden för insamling och lagring av data har sjunkit har möjligheterna att samla in och lagra data ökat. Valet av parametrar som skall lagras är dock inte alltid lätt. De viktigaste driftsparametrarna, såsom drifttid, ångtemperatur, ångtryck och last, bör lagras. Metalltemperaturer, töjningar, förskjutningar och vibrationer är några exempel på andra parametrar som i vissa fall är önskvärda att mäta och lagra för en komponent eller på ett system.

De parametrar som är relevanta att mäta, möjliga metoder och till vilken omfattning mätningarna bör utföras skiljer sig för olika system och komponenter. Målet med de analyser som data ska användas till har stor betydelse för vilka data som ska samlas in och hur hög kvalitet de bör ha. Följande faktorer är exempel som påverkar kvaliteten på data:

- Noggrannhet i mätvärden.
- Relevanta mätpositioner.
- Omfattning av mätpositioner.
- Frekvens av mätningar.

Det som i praktiken ofta kan vara avgörande för i vilken grad data används är:

- Hur pass enkelt de går att bearbeta och överskåda.
- Hur pass enkelt ett önskat urval av uppmätta data kan tas fram.

Tillvägagångssättet att lagra data är av stor betydelse. Alltför stora mängder data blir ohanterligt. Olika typer av dataformat kan försvinna, media kan åldras så att de blir oläsbara. Redan i uppbyggnaden av ett system är det därför vara viktigt att planera för hur lagrade data skall hanteras i framtiden. Då data ska användas är det en stor fördel att ha ett system där man snabbt och enkelt kan ta fram de data man önskar.

Det är alltså viktigt att insamlade data kan ge ett representativt underlag som motsvarar målet med efterföljande analyser och bedömningar. I **kapitel 1.11 Praktisk hantering av livslängdsarbete** finns beskrivet vad som är väsentligt vid insamling av data i relation till vilka mål man kan ställa på livslängdsarbetet.

Det finns många metoder och system som har tagits fram för att kunna övervaka olika driftparametrar och andra parametrar relaterade till driften. En del av dessa finns översiktligt beskrivna i Värmeforskrapport 687 "Oförstörande provning för livslängdsbedömning av högttemperaturanläggningar" samt Värmeforskrapport 893 "Bästa möjliga övervakning av vattenkemin i anläggningar med ångturbin.

### 1.2.4 Insamling av data vid incident – skaderapportering

Information om skador kan möjligen finnas att hämta från de organisationer som bedriver skaderegistrering. Exempel på organisationer som bedriver registrering av skador är Sodahuskommittén, Ångpanneföreningens forskningsstiftelse (Värme- och

kraftsektionens skadegrupp) och inom kontrollföretag. De skador som finns registrerade är skador som påträffats vid återkommande besiktningar och i samband med haverier och skadefall och registren utökas kontinuerligt. De skaderegister som finns tillgängliga kan ge besiktningspersonal och anläggningsägare viss vägledning om kritiska punkter att studera vid inspektioner och tillståndsbedömningar. Utvärderingar av underlaget kan även bidra till att höja säkerheten och utgöra verktyg vid riskbaserade inspektioner.

Varje enskild anläggningsägare bör föra ett eget skaderegister för att ha en god kontroll över den egna anläggningen. Skaderegistret skall ha en koppling till driften av anläggningen för att samband mellan drifttid/driftsätt och skadetillfällen skall kunna registreras. De skador som i första hand bör registreras är skador som är säkerhetsrelaterade och i andra hand de skador som påverkar tillgängligheten och är av stor ekonomisk vikt. Skaderapporteringen bör innehålla uppgifter om nominella driftparametrar, typ av komponent, material i komponent, drifttid, lokalisering av skada, typ av skada, skadans storlek, hur skadan detekterats, med vilken provningsmetod skadan detekterats, orsak till skadan och hur skadan åtgärdats. Skaderapportering bör innehålla alla typer av skador och inte enbart skador i tryckbärande komponenter. I skaderapportering ingår också att registrera uppkomna följdskador.

#### 1.2.5 Koppling mellan underhålls- och livslängdsarbetet

Det finns olika strategier för underhållsarbete och de kan karaktäriseras i olika typer med avseende på vilka grunder det genomförs. Ett antal benämningar förekommer för de olika typerna och de som diskuteras i handboken definieras i nomenklaturen.

Tre typer med väsentliga skillnader är:

- *avhjälpande underhåll* (synonymt med *korrektivt underhåll*) som är oplanerat och utförs först då problem, som till exempel en skada, uppstår.
- *förebyggande underhåll* (synonymt med *preventivt underhåll*) som baseras på tidigare erfarenheter och som planeras i förväg med syfte att undvika oväntade stopp under drift. Det förebyggande underhållet utförs vid fasta intervall på en tidsaxel.
- *tillståndsstyrt underhåll* (synonymt med *proaktivt underhåll* och *prediktivt underhåll*) som baseras på tillståndsovervakning. Det tillståndsstyrda underhållet utförs med rörliga intervall på en tidsaxel.

Underhållsinsatser som endast initieras vid skador leder till stora osäkerheter i tillgänglighet och i vilka kostnader som kan förväntas. Underhållsmetoderna har utvecklats från underhållsinsatser initierade av skada till allt mer strategiskt motiverade insatser. Denna utveckling medför att livslängdsfrågor och underhållsfrågor liknar varandra allt mer i sin struktur.

Förebyggande underhåll har länge varit den dominerande typen. Vad gäller besiktningspliktiga komponenter styrs val av underhållsobjekt och underhållstillfällen upp med utgångspunkt från de inspektioner och inspektionsintervall som regelverken föreskriver. Strategin för besiktningspliktiga komponenter tillämpas många gånger även på andra typer av komponenter. Med tiden har en allt större erfarenhet erhållits och det har visat sig att förebyggande underhåll många gånger förhindrar en tillfredställande optimering av driften, till exempel genom att insatserna prioriteras felaktigt.

Det tillståndstyrda underhållet kräver kännedom om komponenternas tillstånd och denna typ av underhållsarbete går hand i hand med livslängdsarbete. Tillståndsstyrt underhåll tillämpas mer eller mindre systematiskt på enskilda komponenter i många anläggningar och får en allt större betydelse i syfte att optimera driften. Dagens utveckling på området är relativt intensiv.

Ett framgångsrikt livslängdsarbete bör i första hand utföras med hjälp av tillståndsstyrt underhåll. Det är emellertid väsentligt att alla typer av underhållsarbete återförs till livslängdsarbetet.

Ett fungerande underhållsarbete måste kompletteras med ett övergripande livslängdsarbete för att hålla kontroll över en anläggnings åldrande. Detta för att ha kontroll över anläggningen ur ett ekonomiskt perspektiv såväl som ett säkerhetsmässigt perspektiv. Underhållsarbetet har normalt en tidshorisont på ett till högst fem budgetår beroende på hur långsiktiga underhållsplanerna är. Livslängdsarbetet har normalt en tidshorisont på 10 år eller mer. En mer ingående beskrivning av metoder för inspektions- och underhållsplanering samt dess koppling till livslängdsarbetet ges i **kapitel 9**.

En uttalad underhållsstrategi med systembunden diagnostik är en god hjälp. Underhållsstrategierna har utvecklats under påverkan av nya diagnostikverktyg, databaserade utvärderingsprogram och tillgång till databaser. Under senare år har utvecklingen gått mot mätbaserad diagnostik, d.v.s. mätbaserad uppmätning och registrering av belastningar, deformationer, vibrationer, strömmar, materialtemperaturer etc, som minskar osäkerheterna i bedömningar jämfört med tidigare.

Olika typer av system finns för underhåll, dokumentation, m.m. Dessa system säljs av olika företag och förändras samt utvecklas kontinuerligt. Det går inte att säga vilket system som är bäst. Det viktiga är att i varje enskilt fall identifiera det egna behovet och hitta ett system som kan uppfylla detta.

#### 1.2.6 Uppföljning av ny teknik

Under de senaste decennierna har nya tekniker för kraft- och värmeproduktion introducerats på marknaden såsom olika typer av fluidbäddar samt rök-gaskondensering. I framtiden kommer andra nya tekniker att introduceras. Oavsett vilken teknik som introduceras kommer den att vara behäftad med "barnsjukdomar". Det är därför extra viktigt att uppföljningar görs för de första anläggningarna avseende problem, tillgänglighet, kostnader, problemlösningar, m.m.

Under 1990-talet genomfördes två större uppföljningar, som redovisats öppet, i Sverige med syftet att kartlägga tillgänglighet och skador i anläggningar med relativt oprövad teknik. Dessa uppföljningar gjordes vid CFB-pannan i Örebro och PFBC-anläggningen i Värtan. Denna typ av uppföljning bör planeras redan då en beställning görs. Arbetet bör planeras i samarbete mellan leverantör och beställare eller möjligen i samarbete med branschorganisationer. Att genomföra denna typ av arbete inom en branschorganisation kan motiveras av intresse från efterföljande köpare och behovet av kunskap. Uppföljningen är av värde för såväl anläggningsägaren, leverantören som senare köpare.



Den uppföljning som kan eller bör genomföras kan innefatta uppföljning av driftdata, speciella kontinuerliga mätningar på känsliga punkter, mätningar av materialtjocklekar vid avställningar, demontering och inspektion av utrustning, m.m.

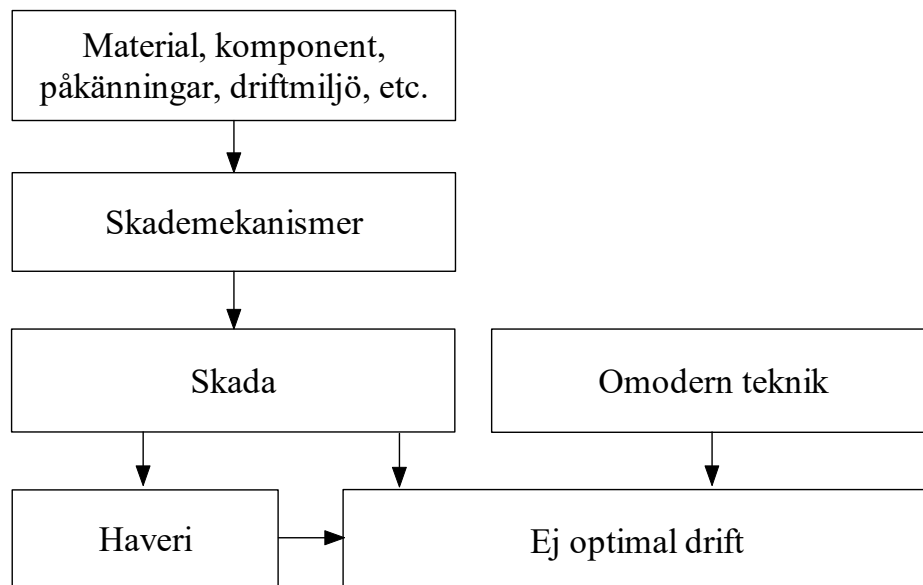
### 1.3 BEDÖMNING AV EN ANLÄGGNINGIS TILLSTÅND OCH DESS ÅTERSTÅENDE LIVSLÄNGD

Den pågående globaliseringen och avreglering av elmarknaden med ökad konkurrens som följd tillsammans med den ökade miljömedvetenheten har lett till höjda krav på ett effektivt utnyttjande av tillgängliga resurser. Vad gäller energianläggningar innebär detta att optimal drift med så få oplanerade stopp som möjligt eftersträvas beaktande tekniska, ekonomiska och miljömässiga krav. För att klara denna situation är det avgörande att ha en god kännedom om anläggningens tillstånd och dess återstående livslängd.

Arbetet med en anläggnings återstående livslängd har två övergripande syften:

- Säkerställa att haveri inte uppstår.
- Optimera driften.

Av Figur 1.3-1 framgår orsakssamband ledande till haveri eller **inte** optimal drift ur ett livslängdsanalysperspektiv. För att kunna arbeta med en anläggnings livslängd och för att kunna påverka dess framtid genom livslängdsstyrning krävs således kunskap och förståelse för de olika stegen som kan leda till haveri och/eller **inte** optimal drift.



Figur 1.3-1. Orsakssamband ledande till haveri eller ej optimal drift ur ett livslängdsanalysperspektiv.

Figure 1.3-1. Reasons for failure or non-optimal plant operation in the perspective of life time assessment.

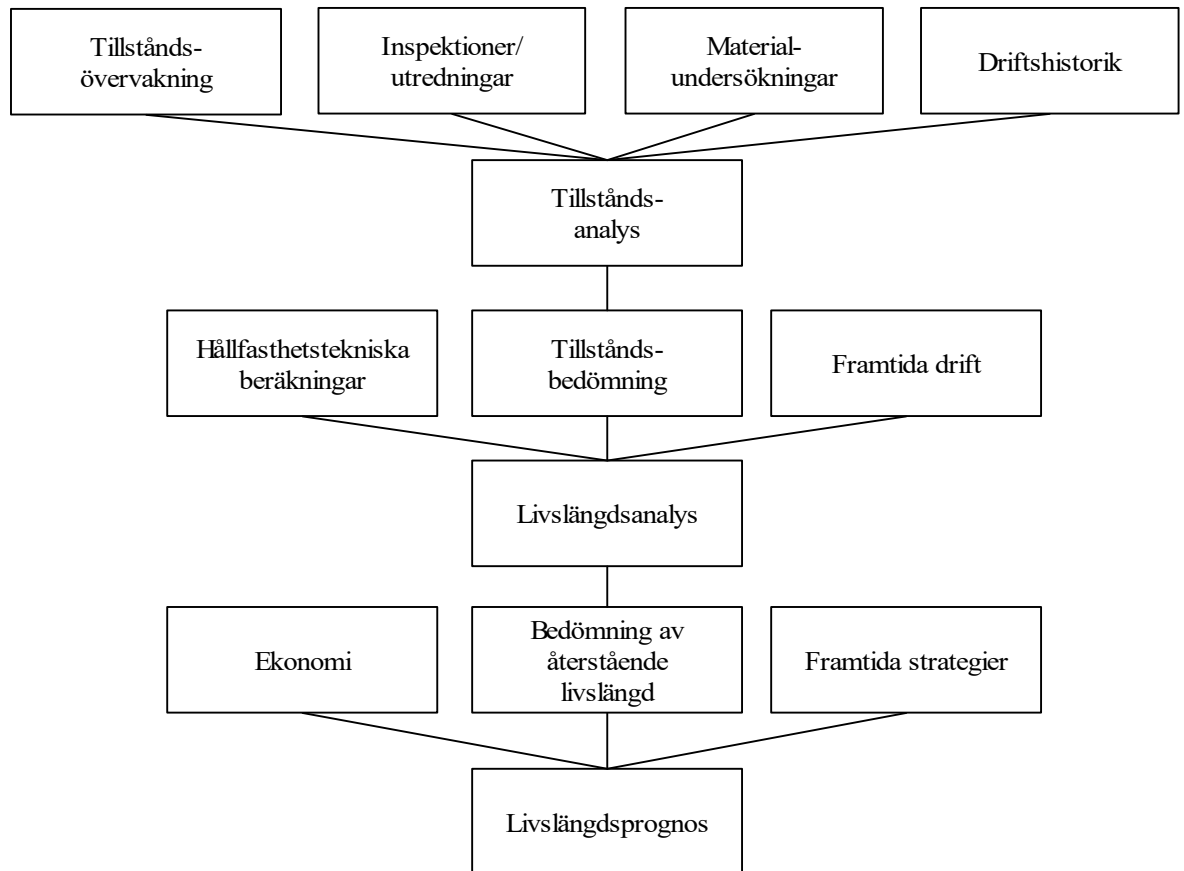


För att kunna bedöma om en mekanisk komponent har tillfredsställande säkerhet mot haveri krävs det till att börja med kännedom om vilken eller vilka haverimekanismer (exempelvis brott, plastisk kollaps eller buckling) som kan vara aktuella. Vidare krävs det för varje haverimekanism ett kriterium mot vilket det kontrolleras att risken för haveri är tillräckligt liten. Dessa kriterier framgår normalt av de dimensioneringsregler komponenten dimensionerats mot. Ofta anges kriterierna i form av att en säkerhetsfaktor appliceras på någon karakteristisk storhet (exempelvis den last som leder till brott, plastisk kollaps eller buckling). I fall där kriterier för tillfredsställande marginal mot haveri saknas kan allmänna handböcker, litteratur och praktiska erfarenheter ge vägledning. Risknivån bör då motsvara risknivån för övriga aktuella haverimekanismer där kriterier för haveririsk är given.

En mekanisk komponent som initialt har en tillfredsställande marginal mot haveri kan genom inverkan av en eller flera skademekanismer erhålla en skada eller åldras resulterande i att risken för haveri överstiger vad som tillåts. Av detta följer att kunskap om tänkbara skademekanismers inverkan på komponenten som funktion av material i komponenten, materialtillstånd hos komponenten, påkänningar i komponenten, driftsbetingelser och komponentgeometri är avgörande för att kunna bedöma komponentens återstående livslängd.

Att optimera driften av en anläggning är det andra övergripande syftet med livslängdsarbetet. I ett livslängdssammanhang är det väsentligen skador på komponenter och att komponenter blir tekniskt omoderna som studeras, se Figur 1.3-1.

Kopplingen mellan en komponents tillstånd och dess återstående livslängd framgår av Figur 1.3-2. För att kunna bedöma en komponents återstående livslängd krävs information om dess tillstånd, resultat från hållfasthetstekniska beräkningar samt information om planerad framtida drift för komponenten.



**Figur 1.3-2.** Livslängdsarbete – indata för bedömning av återstående livslängd.

**Figure 1.3-2.** Life management - input for assessment of residual lifetime.

För att kunna bedöma en komponents tillstånd krävs det kännedom och kunskap om följande:

- Komponentens materialegenskaper och dess geometri.
- Yttre och inre skador/defekter i komponenten som är orsakade av materialdegenererande eller sprickbildande mekanismer alternativt införda vid tillverkning av komponenten.
- Driftshistorik, d.v.s. den miljö och de påkänningar komponenten varit utsatt för.
- Den eller de haverimekanismer som är aktuella.
- Den eller de skademekanismer som är aktuella.

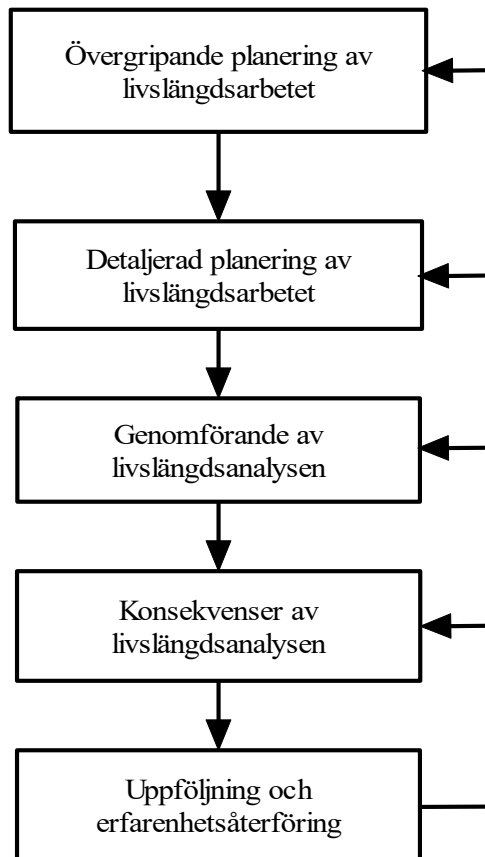
Dessutom är det mycket värdefullt att ha tillgång till inspektions- och provningshistorik, särskilt från återkommande provning. Trender rörande hur tillståndet förändras under tid kan då utvärderas.

I planerad framtida drift inbegrips flera faktorer som kan inverka på bedömningen av en komponents återstående livslängd:

- Den miljö och de påkänningar komponenten kommer att utsättas för.
- Hastighet med vilken en eventuell skada/defekt utvecklas/tillväxer.
- Högsta grad av skada/defektstorlek som är acceptabel.

- Den eller de haverimekanismer som kan bli aktuella.
- Den eller de skademekanismer som kan bli aktuella.

I det följande kommer flödet i livslängdsarbetets arbetsprocess studeras. De huvudsakliga delarna i detta flöde framgår av Figur 1.3-3 där en tidsaxel är tänkt att gå uppifrån och ner. Tyngdpunkten kommer att läggas på de tre senare blocken, d.v.s. genomförandet av livslängdsanalysen, konsekvenserna av livslängdsanalysen och uppföljning och erfarenhetsåterföring.



**Figur 1.3-3.** Flödesschema för livslängdsarbetet.

**Figure 1.3-3.** Life assessment process flow chart.

Som framgår av Figur 1.3-3 präglas livslängdsarbetet av att vara en iterativ process. Med detta menas att noggrannheten och säkerheten i livslängdsanalysen samt graden av hur rationellt livslängdsarbetet/livslängdsstyrningen genomförs successivt förbättras genom att gjorda lärdomar och erhållna erfarenheter från tidigare livslängdsarbeten används i den pågående livslängdsarbetsprocessen. För att denna iterativa process ska fungera tillfredsställande krävs det att uppföljning och erfarenhetsåterföring görs på ett systematiskt sätt och att allt av värde för det fortsatta livslängdsarbetet dokumenteras. Samtliga steg i processflödet i Figur 1.3-3 både ger och tar information i den iterativa processen.

### 1.3.1 Nulägesbeskrivning/förstudie

En nulägesbeskrivning (kallas även förstudie) föregår en livslängdsanalys och dess syfte är att ligga till grund för beslut om **hur** livslängdsanalysen ska genomföras. Nulägesbeskrivningen ingår nödvändigtvis inte i själva livslängdsanalysen men utgör grunden för och påverkar detta arbete.

Nulägesbeskrivningen bör innehålla uppgifter om haverier, skador, drifttider och driftdata, d.v.s. drifthistorik, samt inspektions- och provningshistorik. Det är några av byggstenarna i livslängdsarbetet (jfr Figur 1.3-2). Omfattning, tillgänglighet och tillförlitlighet av uppgifterna på historiken bör beaktas redan här eftersom det kan påverka insatserna inom andra byggstenar i livslängdsarbetet och även i viss mån inverka på livslängdsarbetets möjligheter och begränsningar. Vid behov kompletteras underlaget genom intervjuer av personalen avseende frågor rörande haverier, driftstörningar, m.m. som är relevanta för livslängdsarbetet, till exempel händelser som har otillfredsställande dokumentation eller saknar sådan. Viktiga insikter om livslängdsarbetets förutsättningar kan alltså erhållas redan på detta stadium. Dessutom ska resultat från eventuella tidigare livslängdsanalyser, förändringar i lagar och förordningar, m.m. som är av vikt för beslut om genomförandet av en livslängdsanalys tas med i en nulägesbeskrivning.

### 1.3.2 Övergripande planering av livslängdsarbetet

Första steget vid genomförandet av ett livslängdsarbete (här definierat som en avgränsad insats rörande en anläggnings livslängd) är att övergripande planera tänkta insatser. Syftet med denna aktivitet är dels att skapa en första plattform för livslängdsarbetet att utgå ifrån och dels att på ett tidigt stadium få en möjlighet att väga olika alternativa insatser mot varandra och därigenom kunna optimera användandet av tillgängliga resurser. Som tidigare nämnts är arbetet med en anläggnings livslängd iterativt till sin natur. Erfarenheter från tidigare genomförda livslängdsarbeten på den aktuella anläggningen kan således direkt användas för att underlätta och förkorta arbetet med den övergripande planeringen.

Vad gäller detta första steg är planeringen mer övergripande. Efter hand som livslängdsarbetet fortskrider förfinas planeringen successivt. I den övergripande planeringen beaktas faktorer såsom:

- Syftet med livslängdsarbetet.
- Organisation.
- Utvärdering av tidigare genomförda livslängdsarbeten.
- Insamling av övergripande anläggningsdata.
- Utvärdering av nyttan med livslängdsarbetet.
- Screening av vilka anläggningsdelar och system som bör ingå i analysen samt om några kan uteslutas.
- Uppskattning av kostnaden för livslängdsarbetet.
- Framtagande av övergripande plan för livslängdsarbetet.

#### 1.3.2.1 Syftet med livslängdsarbetet

De av företagsledningen fastställda strategier och framtida inriktning för en anläggning har direkt inverkan på hur livslängdsstyrningen av anläggningen ska ske såväl som på syftet med det enskilda livslängdsarbetet. För att livslängdsarbetet ska fungera väl är

det viktigt att syftet med livslängdsarbetet är klarlagt, tydligt, kan kvantifieras och att det är förankrat i företagets ledning. Tänkbara syften kan vara:

- Kontroll av en komponents eller systems integritet fram till nästa avställning.
- Upprättande av intervaller för kontroll, reparationer och underhåll.
- Undersöka möjligheten att använda en komponent eller ett system efter det att designlivslängden uppnåtts.
- Undersöka om anläggningen kan drivas t.ex. ytterligare tio år och om och i så fall vilka åtgärder som krävs för detta.
- Kännedom om investeringsbehovet inom en framtida period.

Resultat från en livslängdsanalys kan komma att påverka syftet med framtida livslängdsanalyser såväl som den övergripande strategin och framtida inriktningen för anläggningen. Att ha beredskap för alternativa scenarier som kan tänkas uppkomma kan underlätta livslängdsarbetet. Strategier för att uppnå syftet med en verksamhet förändras med tiden. Förändringar i omvärlden som kan påverka ett företags strategier kan exempelvis vara ökad efterfrågan av grön el, regler för utsläppshandel och utbyggnad av vindkraft. Detta kan i sin tur medföra att syftet med livslängdsanalyser förändras som följd av exempelvis förändringar i bränsleval eller att baslastdrift överges till förmån för cyklisk drift.

Syftet med livslängdsanalysen skall fastställas inledningsvis. Såväl livslängdsarbetet i stort som den enskilda livslängdsanalysen bör sättas i relation till vilka företagets kunder är, varför de behöver organisationens produkter och tjänster samt hur livslängdsarbetet och den enskilda livslängdsanalysen skall förstärka kundnyttan. Livslängdsarbetet i stort och den enskilda livslängdsanalysen bör även sättas i relation till företagets konkurrenskraft.

#### 1.3.2.2 Organisation

Livslängdsarbetet är nära kopplat till arbetet med energianläggningens ekonomi, planering, drift, underhåll, konstruktion, etc. Av detta följer att ett flertal personer/funktioner från olika delar av den egna organisationen involveras i livslängdsarbetet. Ofta engageras även extern personal på grund av resursbrist eller för konsultation inom områden där egen kompetens saknas. En förutsättning för att livslängdsarbetet ur detta perspektiv ska fungera effektivt är att arbetet organiseras och planeras väl.

I det dagliga arbetet med energianläggningens livslängdsfrågor är det oftast enbart en eller ett fåtal personer inblandade. En för anläggningen utsedd livslängdsansvarig, vanligen anläggningens underhållschef, sköter de löpande frågorna.

Vid genomförandet av större livslängdsarbeten (exempelvis bedömning av en ångpannas återstående livslängd) har projektarbetsformen visat sig vara lämplig. Till projektledare utses vanligen den livslängdsansvarige på anläggningen vars uppgift blir att inom givna ramar (funktion, tid, kostnad) och utgående från vald strategi leda livslängdsarbetet. Projektgruppen bemannas genom att projektledaren "köper" tjänster från den egna linjeorganisationen, vanligtvis kompletterad med extern personal och expertis. Fördelen med att låta projektgruppen vara sammansatt av personal från olika delar av den egna organisationen är dels att livslängdsarbetet kan genomföras på ett rationellt sätt (personal med relevant kompetens) och dels att livslängdsarbetet förankras inom hela organisationen. Det senare leder dessutom till att risken för konflikter mellan olika personalgrupper minskar.

För att projektet ska bli framgångsrikt är det avgörande att livslängdsinsatsen är förankrad i företagsledningen.

En personalanalys bör alltid göras. Personalanalysen skall visa på vilka kompetenser som finns inom den egna organisationen och hur dessa skall användas samt vilken eller vilka kompetenser som behöver utvecklas. Personalanalysen ligger också till grund för fastställande av vilken kompetens som behöver hyras in för en livslängdsanalys.

Två exempel på hur en livslängdsanalys kan organiseras ges i **del 3 i handboken**.

#### 1.3.2.3 *Utvärdera tidigare genomförda livslängdsarbeten*

Erfarenheter och utfall av tidigare genomförda livslängdsarbeten utvärderas för att ge information till den övergripande planeringen. Har tidigare livslängdsarbeten inte genomförts på den aktuella anläggningen sammanställs resultat och erfarenheter från genomförda inspektioner, underhåll, reparationer, utbyte, etc. Erfarenheter från livslängdsarbeten utförda på liknande anläggningar kan också ge värdefull information. Information som tagits fram i en nulägesbeskrivning tas tillvara.

#### 1.3.2.4 *Insamling av övergripande anläggningsdata*

En delmängd av underlaget för olika beslut i livslängdsarbetsprocessen består av övergripande anläggningsdata. Hit räknas exempelvis:

- Existerande anläggnings prestanda (tillgänglighet, utnyttjandegrad, verkningsgrad, etc.)
- Existerande anläggnings olika kostnader.
- Inverkan av genomförandet av olika livslängdsprogram på anläggningens prestanda och kostnader.

Information som tagits fram i en nulägesbeskrivning tas tillvara.

#### 1.3.2.5 *Utvärdering av nyttan med livslängdsarbetet*

Som ett led i att bedöma vilka insatser som ska ingå i livslängdsarbetet uppskattas och utvärderas nyttan av olika livslängdsaktiviteter på kort och på lång sikt. Både kvalitativa och kvantitativa bedömningar kan vara aktuella. De besparingar som kan göras kvantifieras så långt som möjligt. Det kan t.ex. gälla kostnader i produktionsbortfall för att reparera läckor som uppstår under driftsäsong, vilka kan undvikas om man bedriver ett livslängdsarbete. Stora besparingar kan göras p.g.a. livslängdsförlängande åtgärder, t.ex. innebärande att en anläggning kan köras flera år längre än planerat. Reinvesteringar kan göras vid rätt tidpunkt: innan äldre system orsakar tillgänglighetsproblem men inte tidigare än nödvändigt. Livslängdsanalyser ger också besked om det lönar sig med reinvesteringar i en anläggning eller om dess skick är sådant att det lönar sig bättre med en helt ny. Efter genomförd livslängdsanalys rekommenderas en utvärdering av hur stora besparingar som analysen resulterade i.

#### 1.3.2.6 *Screening av vilka delar av anläggningen som ska ingå i analysen*

De delar av anläggningen som ska ingå i analysen utvärderas översiktligt. Eventuella system som är utbytta mot nya samt nytillkomna anläggningsdelar behöver normalt inte analyseras. Det räcker oftast med ordinarie inspektions- och provningsprogram. Eventuella delar av anläggningen som har orsakat tillgänglighetsproblem bör ingå.

Sammanställning av historik, överslagsmässiga beräkningar samt erfarenheter kan indikera andra delar som bör vara med.

#### 1.3.2.7 Uppskattning av kostnader för livslängdsarbetet

För att kunna styra arbetet med en anläggnings livslängd är det viktigt att kostnaden för de insatser som livslängdsarbetet för med sig uppskattas kontinuerligt under arbetsprocessens gång. Denna kostnadsuppskattning är till en början grovare då omfattningen av konsekvenserna av livslängdsbedömningen på ett tidigt stadium är oklar och vanligtvis studeras inledningsvis ett flertal alternativa strategier för hur livslängdsarbetet ska genomföras. Efter hand inriktningen på livslängdsarbetet tar form och ju längre livslängdsarbetsprocessen pågått desto noggrannare kan kostnadsuppskattningen göras. Genom denna iterativa process kan relationen mellan kostnad och erhållen vinst/nytta för respektive insats successivt stämmas av.

#### 1.3.2.8 Övergripande plan för livslängdsarbetet

Baserat på tidigare erfarenhet och den information som framkommit under den inledande fasen av livslängdsarbetet tas en övergripande plan fram för livslängdsarbetet. I denna plan ingår åtminstone följande information:

- Delaktiga personer i livslängdsarbetet, ansvarig.
- Övergripande strategi för anläggningen och syftet med livslängdsanalysen.
- Tillgängliga interna resurser, leverantörer och konsulter för genomförandet av livslängdsanalysen.
- Analys av för- och nackdelar med olika alternativa inriktningar på livslängdsanalysen.
- Information om kostnader som framkommit under den inledande fasen.

#### 1.3.2.9 Risk- och osäkerhetsbedömning av livslängdsarbetet

Det är viktigt att på ett tidigt stadium lyfta fram risker och osäkerheter med tänkta livslängdsinsatser. Detta kan gälla exempelvis i vilken utsträckning uppsatta mål kan uppnås med den strategi och de metoder som har planerats för livslängdsarbetet. Denna kännedom kan inverka på val av livslängdsaktivitet.

### 1.3.3 Detaljerad planering av livslängdsarbetet

Den tillsatta projektledaren ansvarar för planeringen av livslängdsarbetet. Större delen av planeringsarbetet utförs innan några detaljerade analyser av enskilda komponenter görs. Under livslängdsarbetets gång uppdateras planeringen successivt beroende på erhållna resultat. I planeringen ingår bland annat följande:

- Insamling av data för anläggningen.
- Rankning av systemen i anläggningen.
- Förfinad kostnadsuppskattning.
- Förfinad plan för livslängdsarbetet.

#### 1.3.3.1 Insamling och sammanställning av data för anläggningen

För att kunna arbeta strukturerat listas samtliga huvudsystem i anläggningen varefter varje huvudsystem delas in i komponenter. Historiska driftdata (och motsvarande) för respektive system och komponent som kan tänkas vara till stöd vid prioritering av de olika komponenterna samlas in. Exempel på sådana data kan vara:

- Information om genomfört underhåll.
- Information om genomförda inspektioner och provningsinsatser.
- Information om tillgänglighet.
- Haverirapporter.
- Intervjuer med tidigare och nuvarande driftspersonal.
- Driftspersonalens loggböcker.
- Driftdata som tagits fram till nulägesbeskrivningen med eventuella kompletteringar.

Även data från liknande energianläggningar (systemanläggningar) kan ge information av värde. Efter insamlandet sammanställs data för respektive anläggningsdel, system och komponent så att följande kan åskådliggöras:

- Frekvens av eventuella skadeproblem.
- Trender rörande t.ex. godsförtunning och sprickbildning från återkommande provning.
- Åtgärder och effekt av åtgärder för att minska eller förebygga skador.
- Kompletterande inspektion och provning som behövs för att kunna fastställa tillståndet hos system och komponenter.

#### 1.3.3.2 Rankning av systemen i en anläggning

Att ranka de olika systemen i en anläggning innebär att delsystemen grupperas utgående från ett eller flera urvalskriterier. Syftet med rankningen är att välja ut de system/komponenter som ska ingå i livslängdsarbetet på ett sådant sätt att tillgängliga resurser **används** på ett optimalt sätt. Den metod (kriterier) som används bör vara enkel så att rankningen inte blir alltför komplex. Erfarenheter från tidigare livslängdsarbete ger värdefull information vid val av urvalskriterier. Det är vidare viktigt att valda kriterier för rankningen är förankrade i ledningen för anläggningen.

Exempel på enklare urvalskriterier för rankning är:

- Äldsta systemen.
- Mest kritiska system ur ett säkerhetsperspektiv.
- System med liknande ålder, typ av drift och design.
- System som kan tas ur drift längst tid.
- System som kan tas ur drift kortast tid.
- Erfarenheter av vilka system och komponenter som har begränsad livslängd och kan orsaka tillgänglighetsproblem.

Mera detaljerade urvalskriterier kan exempelvis baseras på:

- Viktfaktorer, exempelvis feleffektanalysmetoden (se exempel 1 i del 3 i handboken).
- Nyttan av olika livslängdsinsatser.
- Kostnad/nytta-kvoter.

Ett sätt att på ett rationellt och strukturerat sätt ranka systemen i en anläggning är att använda riskbaserade metoder. Dessa metoder baseras på att risken för att en händelse ska inträffa kan beräknas genom att multiplicera sannolikheten för och konsekvensen av att händelsen ska inträffa. Det eller de system som uppvisar störst risk är de som väljs ut för att ingå i livslängdsarbetet. Teknisk, ekonomisk och miljömässig risk, **så väl som säkerhetsrisk**, kan väljas att studeras. Se vidare kapitlet om riskbaserad inspektion i denna handbok.



### 1.3.3.3 Förfinad kostnads- och nyttouppskattning

En förfinad uppskattning av de kostnader och den nytta som livslängdsarbetet för med sig görs för de system/komponenter som valts ut genom rankningen. Denna kostnads- och nyttouppskattning förfinas successivt efterhand **då** mer information om livslängdsarbetets konsekvenser blir känd.

### 1.3.3.4 Förfinad plan för livslängdsarbetet

Den redan framtagna planen förfinas för de system/komponenter som valts ut att ingå i livslängdsarbetet. Planen uppdateras successivt efterhand arbetet framskrider. Följande planeras:

- Vilka provningsmetoder behövs för att fastställa respektive system och komponents tillstånd.
- Tidplan för genomförande av provningen. Nödvändiga åtgärder i form av ställningsbygge och avisolering samt återsvetsning.
- Bestämning av vilka analyser och analysverktyg som behövs för att bestämma återstående livslängd.

### 1.3.4 Genomförande av livslängdsanalysen

Syftet med denna del i livslängdsarbetet är att på komponentnivå ta fram ett underlag för att kunna bedöma om komponenten under kommande driftsperiod kan tas i drift utan åtgärd (med eventuellt ändrade driftsparametrar), om komponenten måste repareras eller om den måste bytas ut. Under förutsättning att komponenten är dimensionerad så den initialt vid drifttagandet uppfyller säkerhetskraven enligt vedertagna normer är det väsentligen kunskap och förståelse för aktuella haveri- och skademekanismer som kommer att styra livslängdsanalysen. Information om följande tre områden bildar grunden för bedömning av komponentens återstående livslängd:

- Komponentens tillstånd (nuvarande grad av ackumulerad skada i komponenten).
- Hur snabbt aktuell skada tillväxer.
- Vilken grad av skada som leder till att säkerhetsvillkoren inte är uppfyllda, dvs. den största skada som är acceptabel.

Tänkbara skademekanismer är erosion, korrosion, krypning, utmattnings, nötning, m.fl. Se **kapitel 1.5** i handboken för en mer detaljerad genomgång. Exempel på haverimekanismer är brott, plastisk kollaps, buckling. Tillfredsställande marginal till haveri ges normalt i vedertagna normer och standarder för dimensionering av aktuell komponent.

Bedömning av en komponents tillstånd och dess återstående livslängd kan ske utgående från ett flertal olika metoder. Gemensamt för dessa är att:

- Noggrannheten i bedömningen (som är avhängig noggrannheten av indata och analys) bör vara relevant för ändamålet. En för hög noggrannhet är onödigt kostsam medan en för låg noggrannhet kan resultera i att felaktiga beslut fattas angående komponentens framtida drift.
- Bedömningen ska basera sig på kriterier i för ändamålet vedertagna normer, standarder, "Code of Practice", etc. I fall där sådana kriterier saknas kan egen dokumenterad erfarenhet ge vägledning.

#### 1.3.4.1 Noggrannheten i livslängdsanalysen

För att få ut det mesta möjliga av de resurser som tilldelats livslängdsarbetet är det väsentligt att lägga sig på rätt noggrannhetsnivå i livslängdsanalysen. För vissa komponenter kan förenklade och starkt konservativa analyser vara tillräckliga som underlag för beslut om framtida drift medan det för andra komponenter krävs djupare analyser med högre noggrannhet för att kunna verifiera framtida drift med betryggande säkerhet. Ett flertal modeller för att göra denna noggrannhetsindelning existerar. I denna handbok studeras EPRI:s tillvägagångssätt som ett exempel av flera.

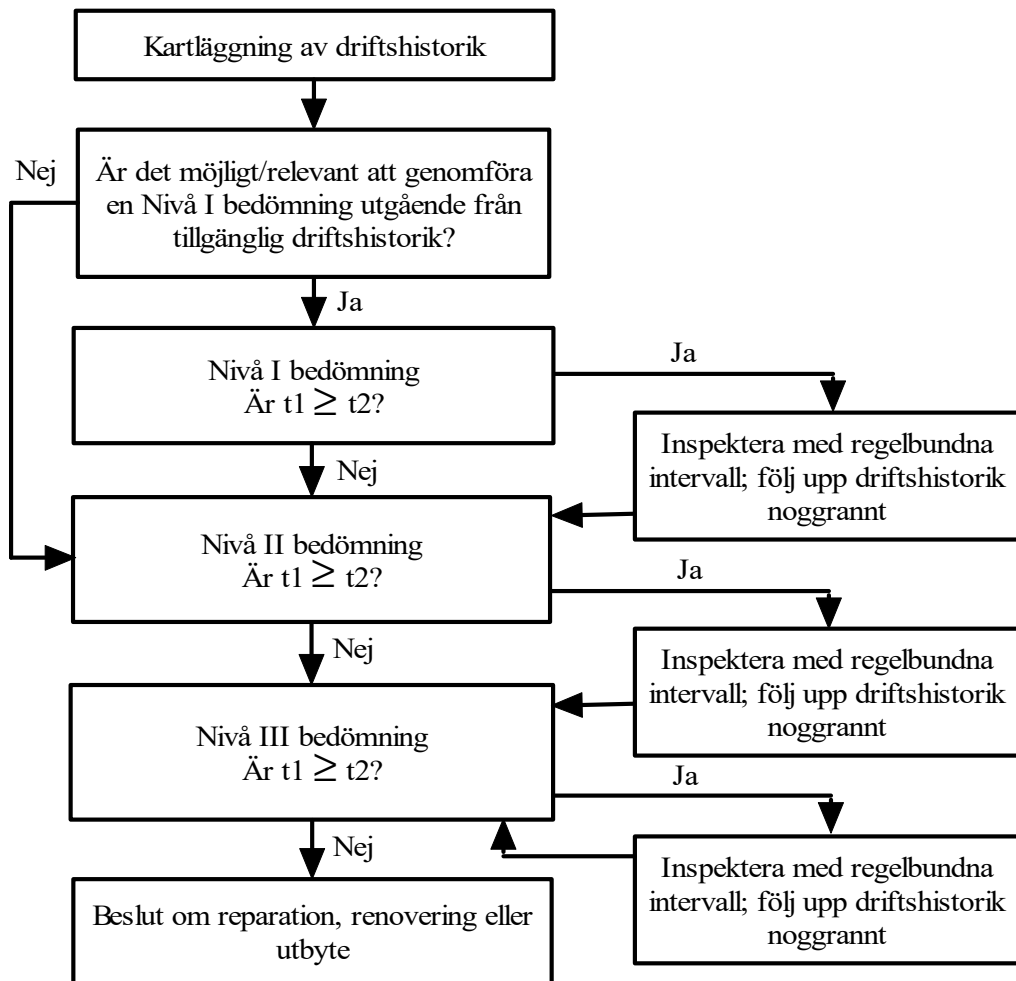
I EPRI:s handbok, EPRI CS-4778, har man valt att dela in livslängdsanalysen i tre noggrannhetsnivåer. Utgående från dessa noggrannhetsnivåer har en generisk procedur tagits fram för att styra upp arbetet, se Figur 1.3-4. En Nivå I bedömning är den första i flödesschemat. Indata till denna har den lägsta noggrannhetsnivån och består av designdata, nominella värden och information från tidigare inspektioner, etc., se Tabell 1.3-1. Samtliga gjorda antagande måste vara konservativa för att resultera i en konservativ bedömning. En Nivå I bedömning kan göras utan kontakt med anläggningen och därmed också på ett tidigt stadium under livslängdsarbetsprocessen. Härigenom kan resultatet ifrån en Nivå I bedömning även användas vid planeringen av det fortsatta livslängdsarbetet. I vissa fall saknas nödvändig drifthistorik varför en Nivå I bedömning inte är möjlig att genomföra.

En bedömning enligt Nivå II kan bli aktuell om bedömningen enligt Nivå I inte kunde visa på att återstående drifttid med betryggande säkerhet var längre än längden på kommande driftsperiod eller om en Nivå I bedömning inte kunde genomföras på grund av bristande underlag. Vid en övergång från Nivå I till Nivå II ökas noggrannhet i indata och analys, se Tabell 1.3-1. En Nivå II bedömning innefattar mätningar och inspektioner i anläggningen. Fortfarande görs dock enklare beräkningar. Om även denna bedömning inte kan visa att systemet eller komponenten kan tas i drift med betryggande säkerhet tills nästa stopp ökas noggrannheten ytterligare till Nivå III.

Denna tredje nivå innefattar den högsta noggrannhetsnivån. Inspektioner och beräkningar görs mer detaljerade och materialuttag för att fastställa materialegenskaperna kan bli aktuell, se Tabell 1.3-1. Om även denna bedömning visar att komponentens resterande livslängd inte är tillräcklig återstår det att besluta om ändrad drift, om reparation eller om utbyte, se kapitel nedan.

För samtliga nivåer gäller att program för återkommande inspektion och uppföljning av drifthistorik upprättas.

Generellt sett är metodiken att gå från en bred konservativ bas till mer noggranna och kostsamma analyser, om det är nödvändigt - ett kostnadseffektivt sätt att bedriva en livslängdsanalys.



t1 = återstående livslängd med betryggande säkerhet  
t2 = drifttid till nästa bedömning av återstående livslängd

Figur 1.3-4. Generisk procedur för bedömning av återstående livslängd enligt EPRI CS-4778.  
Figure 1.3-4. A generic procedure for component life assessment according to EPRI CS-4778.

**Tabell 1.3-1. Nödvändiga data för olika nivåer på bedömning av återstående livslängd enligt EPRI CS-4778.****Table 1.3-1. Required data for different levels of remaining life assessments according to EPRI CS-4778.**

|                        | Nivå I                                                        | Nivå II                              | Nivå III                       |
|------------------------|---------------------------------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------|
| Detaljeringsnivå       | Minst                                                         | Mer                                  | Mest                           |
| Haverihistorik         | Enligt protokoll                                              | Enligt protokoll                     | Enligt protokoll               |
| Dimensioner            | Design eller nominella                                        | Nominella eller uppmätta             | Uppmätta                       |
| Komponentens tillstånd | Protokoll från tidigare inspektioner/provning eller nominella | Inspektion/provning                  | Detaljerad inspektion/provning |
| Temperatur och tryck   | Baserade på design eller driftdata                            | Baserade på driftdata eller uppmätta | Uppmätta                       |
| Spänningar             | Baserade på design eller driftdata                            | Enkla beräkningar                    | Detaljerade beräkningar        |
| Materialegenskaper     | Minvärde                                                      | Minvärde                             | Aktuellt material              |
| Krav på materialuttag? | Nej                                                           | Nej                                  | Ja                             |

#### 1.3.4.2 Kompletterande insamling av data

Utgående från de data som redan samlats in i samband med rankningen av anläggningens olika system och beroende på vilken noggrannhetsnivå för vilken livslängdsanalysen ska genomföras görs en kompletterande datainsamling. Denna kompletterande datainsamling kan göras stegvis efterhand det står klart för vilken noggrannhetsnivå livslängdsanalysen måste genomföras. Sakkunniga kan här ge råd avseende vilka data som är väsentliga för att bedöma systemets återstående livslängd. Inledningsvis bör åtminstone följande information samlas in:

- Drifttimmar för anläggningen.
- Antalet varma och kalla starter.
- Loggade driftdata för anläggningen (tryck, temperatur, etc.).
- Tidigare genomfört underhåll.
- Information om genomförda reparationer och utbyten.
- Analyser och rapporter från tidigare haverier.
- Materialcertifikat.
- Dimensionskontroller.
- Designparametrar.
- Rapporter och protokoll rörande återkommande provning samt eventuella sammanställningar.

Vidare bör följande frågor besvaras:

- Har driftsparametrar såsom tryck och temperatur överskridit designspecifikationen? Hur mycket och under hur lång tid?
- Kommer framtida drift avvika från ursprunglig designspecifikation? Ökad cyklisk drift?
- Har designfilosofi eller sättet att välja material visat sig vara icke-konservativ under tiden anläggningen har varit drift?
- Har antalet skador/haverier varit omfattande?
- Saknas relevant drift- och provningshistorik?

### 1.3.4.3 Kriterier för livslängdsanalysen

De kriterier som styr livslängdsanalysen är väsentligen kopplade till de två övergripande syftena med arbetet med en anläggnings återstående livslängd, nämligen att:

- Säkerställa att haveri inte uppstår.
- Optimera driften.

Vad gäller kriterier för säkerställande av att en komponent inte havererar ges dessa direkt eller indirekt av de dimensioneringsregler mot vilka komponenten har dimensionerats. I fallet att ett haveri i en komponent kan leda till allvarliga skador på person eller egendom är kriterierna tydliga och strikt uppstyrda. Kriterierna är baserade på teoretiska analyser, omfattande provning och lång driftserfarenhet. För komponenter där ett haveri har en mindre inverkan på person eller egendom kan kriterierna vara mindre tydliga och ibland helt saknas.

De kriterier mot haveri som dimensionering av komponenten baseras på styrs av de haverimekanismer och de skademekanismer som kan vara aktuella. Beroende på komponent och tillämpning påverkas således utformningen av de kriterier som är tillämpliga. Exempelvis är säkerhetsfaktorn mot haverimekanismen brott i en tryckutsatt komponent högre för kärnteknisk utrustning jämfört med för konventionell utrustning. För en cylinder som utsätts för ett inre alternativt ett yttre tryck väljs enligt gängse dimensioneringsregler en säkerhetsfaktor mot plastisk kollaps på 1.5 medan säkerhetsfaktorn mot buckling väljs till 2. Skillnaden i val av säkerhetsfaktor för dessa två haverimekanismer förklaras av osäkerheten i utfall (plastisk kollaps/buckling) är större i fallet buckling.

Typen av skademekanism påverkar också kriterierna för dimensionering/bedömning av återstående livslängd. I fallet utmattning används normalt en säkerhetsfaktor 2.0 på den spänning som leder till utmattningsbrott medan det i fallet krypning används en säkerhetsfaktor 1.5 på den membranspänning som leder till krypbrott vid den tid som komponenten är dimensionerad för.

Säkerheten mot haveri ska vara betryggande under konstruktionens hela tekniska livslängd. Detta innebär att minst samma säkerhetsnivå som tillämpas vid dimensionering av en konstruktion också ska tillämpas vid bedömning av dess tillstånd eller dess återstående livslängd. Hur "överföringen" av säkerhetsnivån ska ske är dock inte alltid självklar och får då hanteras från fall till fall.

Som en delmängd av kriterier för optimering av driften ingår vanligtvis kriterier för säkerställandet av att en komponent eller system inte havererar. (Det är sällan optimalt att komponenter havererar). Kriterier härutöver är inte lika självklara. Vanligen måste den enskilda anläggningsägaren skapa sina individuella kriterier/frågeställningar för optimal drift av den egna anläggningen. Anläggningens tillgänglighet, dess tillförlitlighet, underhåll och driftsekonomi är centrala områden i detta sammanhang. Exempel på kriterier/frågeställningar i samband med optimering av driften kan vara:

- Vilka kostnader/intäkter medför fortsatt drift av en komponent som funktion av dess tillstånd? Acceptabla samt optimerade kostnader i förhållande till intäkter?
- Vilken inverkan på kostnader/intäkter har en reparation eller ett utbyte av en komponent eller system? Acceptabla samt optimerade kostnader i förhållande till intäkter?

- Vilken inverkan på kostnader/intäkter kan en fördjupad eller utvidgad livslängdsanalys få? Acceptabla samt optimerade kostnader i förhållande till intäkter?

#### 1.3.4.4 Inspektioner och provning

Storleken på insats vad gäller inspektioner och provning beror i första hand på med vilken noggrannhetsnivå livslängdsanalysen ska genomföras. Därutöver inverkar också vilken komponent som ska studeras, materialet i komponenten, komponentens åtkomlighet, vilka skademekanismer som ska undersökas, vilken provningsmetod som ska användas, etc.

För EPRIs Nivå I samlas enbart resultat från tidigare genomförd inspektion och provning in som underlag för analysen. Om denna information saknas för den aktuella komponenten kan resultat från inspektion/provning av motsvarande komponent i systemanläggning i vissa fall ge värdefull indata. För nästa noggrannhetsnivå, Nivå II, genomförs relevant inspektion och provning av aktuell komponent med normal detaljeringsgrad. Slutligen, för den högsta noggrannhetsnivån, Nivå III, genomförs relevant inspektion och provning med hög detaljeringsgrad, se Tabell 1.3-1 ovan. Tanken här är att erhållna inspektions- och provningsresultat ska kunna användas som indata i efterföljande detaljerade beräkningar.

För att kunna genomföra en relevant inspektion eller provning med fullgott resultat är det viktigt att kunna bedöma och besvara följande frågeställningar:

- Vilka skador är vanligt förekommande för aktuell komponent? I den egna anläggningen, liknande anläggningar?
- Hur har och hur kommer komponenten fortsättningsvis att bli belastad? Spänning, temperatur, miljö, etc.?
- Vilka haverimekanismer kan vara aktuella?
- Hur inverkar aktuella haverimekanismer på komponenten?
- Vilka skademekanismer kan vara aktuella?
- Hur inverkar aktuella skademekanismer på komponenten?
- Vilka är begränsningarna och möjligheterna med aktuell provningsmetod?
- Ska en eller flera provningsmetoder användas?
- Hur omfattande ska inspektionen eller provningen genomföras? Vilka positioner?
- Är det tillräckligt att genomföra oförstörande provning eller måste provningen vara förstörande?
- Hur inverkar förstörande provning på komponentens återstående livslängd? Måste det område där materialuttag görs repareras? Vilken effekt har en eventuell efterföljande svetsreparation på komponentens återstående livslängd?
- Vilken kompetens och tidigare erfarenhet har den personal som ska genomföra och utvärdera inspektionen eller provningen?
- Hur ska erhållna inspektions- och provningsresultat användas i den efterföljande livslängdsanalysen?

Flera av ovanstående frågeställningar kan vara svåra att svara på, vissa besvaras först efter det att en inspektion eller provning genomförts. Att vara medveten om eventuella brister ger dock en möjlighet att säkerställa att bedömningen blir konservativ.

Kompletterande information är att finna i kapitel 1.5 Skademekanismer, kapitel 1.6 Oförstörande provning, kapitel 1.7 Förstörande provning och kapitel 2 Mekaniska komponenter. Ytterligare råd och stöd kan erhållas från sakkunniga på den komponent eller det system som ska provas.

#### 1.3.4.5 Bedömning av återstående livslängd

I begreppet "återstående livslängd" ligger att en driftutsatt komponent förr eller senare måste tas ur drift. Vad som avgör tidpunkten för detta är antingen att komponenten degenererats såpass mycket att tillfredsställande säkerhet inte längre kan garanteras alternativt att komponenten tekniskt, ekonomiskt eller miljömässigt sett blivit omodern. I detta kapitel kommer enbart bedömning av återstående livslängd utgående från degenerering av komponenten behandlas.

Storheten tid förs i livslängdsanalysen in via den eller de skademekanismer som inverkar på komponenten. För att kunna genomföra en kvantitativ bedömning av en komponents återstående livslängd (vilket vanligen är det som eftersträvas) är det nödvändigt att känna till med vilken hastighet aktuell skademekanism degenererar komponenten. Om flera skademekanismer samtidigt är verksamma måste eventuella synergieffekter beaktas. I fallet att aktuell skademekanisms degenereringshastighet inte är känd kan enbart en kvalitativ bedömning av komponentens återstående livslängd göras.

Att bestämma en skademekanisms degenereringshastighet är ofta den svåraste delen i en livslängdsanalys. Den mest optimala situationen är när effekten av aktuell skademekanism successivt, och tillräckligt noga, följs upp sedan drifttagandet av komponenten. Utgående från denna uppföljning kan degenereringshastighet uppskattas. I fallet att graden av skada på grund av en viss skademekanism är känd enbart vid en tidpunkt är det mera vanskligt att bestämma degenereringshastigheten. Eventuellt kan då kompletterande information från en liknande anläggning som arbetar under liknande driftsbetingelser öka säkerheten i uppskattningen. Se vidare **kapitel 1.5 Skademekanismer** och **kapitel 2 Mekaniska komponenter**.

Ett exempel där erfarenheter från liknande anläggningar används vid analys av den egna anläggningen är bedömning av kryputsatta ångledningars återstående livslängd. Utgående från resultat och erfarenheter från omfattande replikprovning av en mängd olika ångledningssystem har metoder tagits fram för bedömning av återstående kryplivslängd hos ångledningar. Med kännedom om mängden krypkaviteter i komponenten (bestäms genom replikprovning) ger metoden den drifttid komponenten kan vara i drift med betryggande säkerhet tills nästa kontroll. Även om metoden i princip enbart kräver kavitetsbestämning från tidpunkten vid vilken bedömningen görs är det att rekommendera att replikprovning görs återkommande för att öka säkerheten i bedömningen. Genom denna metod bedöms skademekanismen krypnings degenereringshastighet indirekt för den komponent som analyseras i form av att tillåten återstående drifttid anges som funktion av aktuell krypskada. Se vidare **kapitel 1.6 Oförstörande provningsmetoder** och **kapitel 2.2 Ångledningar**.

De kriterier mot vilka skademekanismernas degenererande inverkan utvärderas anges vanligen i de dimensioneringsregler komponenten dimensionerats mot. Som tidigare diskuterats är respektive kriterium kopplat till en haverimekanism där säkerhetsnivån förs in genom säkerhetsfaktorer. Förutom relevanta dimensioneringsregler kan speciellt anpassade procedurer användas för bedömning av en komponents återstående livslängd. I dessa procedurer anges inte alltid säkerhetsnivån explicit utan denna får hämtas från motsvarande dimensioneringsregler. I Tabell 1.3-2 ges exempel på ett flertal designkoder och procedurer utgående från vilka livslängdsanalyser kan göras.

**Tabell 1.3-2. Exempel på designkoder och procedurer för livslängdsanalyser av mekaniska komponenter.**

**Table 1.3-2. Examples of design codes and procedures for remaining life time assessments of mechanical components.**

| <b>Designkod/Procedur</b>                                                                                                                                  | <b>Haverimekanism som kan beaktas</b>            | <b>Skademekanism som kan beaktas</b>                                          |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| BSK 07 - Byggnorm för svetsade stålkonstruktioner                                                                                                          | Plastisk kollaps, brott, instabilitet            | Utmattning, godstjockleksförtunnande mekanismer                               |
| Skalhandboken                                                                                                                                              | Instabilitet                                     | Godstjockleksförtunnande mekanismer, krypning                                 |
| IIW-code - Fatigue design of welded joints and components                                                                                                  | Brott                                            | Utmattning, godstjockleksförtunnande mekanismer                               |
| EUROCODE 3                                                                                                                                                 | Plastisk kollaps, brott, instabilitet            | Utmattning, godstjockleksförtunnande mekanismer                               |
| EN12952-4 Water tube boilers and auxiliary installations – Part 4: In-service boiler life expectancy calculations                                          | Brott, krypbrott                                 | Utmattning, krypning, godstjockleksförtunnande mekanismer                     |
| EN13445-3 Unfired pressure vessel – Part 3: Design                                                                                                         | Plastisk kollaps, brott                          | Utmattning, godstjockleksförtunnande mekanismer                               |
| EN13480-3 Metallic industrial piping – Part 3: Design and calculation                                                                                      | Plastisk kollaps, brott, krypbrott               | Utmattning, krypning, godstjockleksförtunnande mekanismer                     |
| ASME Boiler and pressure vessel code, Section VIII, Division 1                                                                                             | Plastisk kollaps, brott, krypbrott, instabilitet | Utmattning, krypning, godstjockleksförtunnande mekanismer                     |
| BS PD6493 Guidance on methods for assessing the acceptability of flaws in welded structures                                                                | Plastisk kollaps, brott                          | Utmattning, miljöbetingad spricktillväxt, godstjockleksförtunnande mekanismer |
| ASME Boiler and pressure vessel code, Section XI, Division 1                                                                                               | Plastisk kollaps, brott                          | Utmattning, miljöbetingad spricktillväxt, godstjockleksförtunnande mekanismer |
| R5 - An assessment procedure for the high temperature response of structures                                                                               | Plastisk kollaps, brott, krypbrott               | Utmattning, krypning, godstjockleksförtunnande mekanismer                     |
| BS PD6539 Guide to methods for the assessment of the influence of crack growth on the significance of defects in components operating at high temperatures | Plastisk kollaps, brott, krypbrott               | Utmattning, krypning, godstjockleksförtunnande mekanismer                     |
| RCC-MR Appendix 16 Design and construction rules for mechanical component of FBR nuclear islands                                                           | Plastisk kollaps, brott, krypbrott               | Utmattning, krypning, godstjockleksförtunnande mekanismer                     |
| ASME Boiler and pressure vessel code, Section III – NH, Division 1                                                                                         | Plastisk kollaps, brott, krypbrott, instabilitet | Utmattning, krypning, godstjockleksförtunnande mekanismer                     |
| Nordtestmetod NT NDT 010<br>High temperature components in power plant: Remnant lifetime assessment, replica inspection                                    | Krypbrott                                        | Krypning                                                                      |



| Designkod/Procedur                                                                                                                                              | Haverimekanism som kan beaktas                                                     | Skademekanism som kan beaktas                                                      |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| Nordtestprojekt 1306-96<br>Evaluation of creep damage from replica inspection results                                                                           | Krypbrott                                                                          | Krypning                                                                           |
| BS PD6510 A review of the present state of the art of assessing remanent life of pressure vessels and pressurized systems designed for high temperature service | Kryp- och kryputmattningsbrott                                                     | Krypning, kryputmattning                                                           |
| API 579 Fitness for service                                                                                                                                     | Sprödbrott, plastisk kollaps, utmattning, krypbrott, miljöinducerad sprickbildning | Utmattning, krypning, gropfrätning, godsförtunning, miljöinducerad sprickbildning, |
| NESC Thermal Fatigue Project EUR 22763 EN                                                                                                                       | Termisk utmattning                                                                 | Termisk utmattning                                                                 |

Nedan följer en kortfattad beskrivning av innehållet i respektive norm eller procedur.

#### BSK 07 - Byggnorm för svetsade stålkonstruktioner

BSK 07 är en byggnorm som framtagits för dimensionering av svetsade stålkonstruktioner. Normen liknar i stora stycken EUROCODE 3 som är dess europeiska motsvarighet. I BSK07 anges bland annat förbandsfaktorer för dimensionering och bedömning av utmattningspåkända svetsförband. Haverimekanismer som kan beaktas är plastisk kollaps, brott och instabilitet. Skademekanismer som kan beaktas är utmattning och godstjockleksförtunnande mekanismer.

#### Skalhandboken

Det primära syftet med skalhandboken är att ge enkla dimensioneringsregler som ger resultat på säkra sidan. Handboken är uppbyggd kring ett flertal olika elementarfall som kan användas för bedömning av buckling och knäckning av skalkonstruktioner. Inverkan av avvikelser från den ideala formen och inverkan av punktlaster kan beaktas. Haverimekanismer som kan beaktas är instabilitet. Skademekanismer som kan beaktas är godstjockleksförtunnande mekanismer och krypning.

#### IIW-code

"IIW-code - Fatigue design of welded joints and components" kan användas för design av utmattningspåkända svetsförband såväl som för bedömning av svetsar innehållande defekter. Med 'klassisk metod' görs analyser utgående från nominella spänningar och tekniker såsom 'hot spot' och 'local approach'. Sprickor bedöms med brottmekaniska metoder. Haverimekanismer som kan beaktas är brott. Skademekanismer som kan beaktas är godstjockleksförtunnande mekanismer och utmattning.

#### EUROCODE 3

EUROCODE 3 kan användas för dimensionering och bedömning av svetsade stålkonstruktioner, jämför med BSK 07. Med 'klassisk metod' görs utmattningsanalyser utgående från nominella spänningar och 'hot spot'-tekniken. Haverimekanismer som

kan beaktas är plastisk kollaps, brott och instabilitet. Skademekanismer som kan beaktas är utmattning och godstjockleksförtunnande mekanismer.

#### EN12952-4

EN12952-4 "Water tube boilers and auxiliary installations – Part 4: In-service boiler life expectancy calculations" är en EN-standard för beräkning av återstående livslängd hos pannrör. Haverimekanismer som kan beaktas är brott och krypbrott. Skademekanismer som kan beaktas är godstjockleksförtunnande mekanismer, utmattning och krypning.

#### EN13445-3

EN13445-3 "Unfired pressure vessel – Part 3: Design" är en EN-standard för dimensionering av tryckkärl. Haverimekanismer som kan beaktas är plastisk kollaps och brott. Skademekanismer som kan beaktas är godstjockleksförtunnande mekanismer och utmattning.

#### EN13480-3

EN13480-3 "Metallic Industrial piping – Part 3: Design and calculation" är en EN-standard för dimensionering av industriella rörledningar tillverkade av metalliska material. Haverimekanismer som kan beaktas är plastisk kollaps och brott. Skademekanismer som kan beaktas är godstjockleksförtunnande mekanismer, utmattning och krypning.

#### ASME VIII

"ASME Boiler and pressure vessel code, Section VIII, Division 1" är dimensioneringsregler för tryckkärl enligt amerikanska regler. Haverimekanismer som kan beaktas är plastisk kollaps, brott och instabilitet. Skademekanismer som kan beaktas är godstjockleksförtunnande mekanismer, utmattning och krypning.

#### BS PD6493

"British Standards Published Document 6493 - Guidance on methods for assessing the acceptability of flaws in welded structures" är en procedur för bedömning av sprickor i komponenter som arbetar vid temperaturer under gränstemperaturen för krypning. Sprickor bedöms med brottmekaniska metoder. Haverimekanismer som kan beaktas är plastisk kollaps och brott. Skademekanismer som kan beaktas är godstjockleksförtunnande mekanismer, miljöbetingad sprickbildning och utmattning.

#### ASME XI

"ASME Boiler and pressure vessel code, Section XI, Division 1" är en amerikansk procedur för bedömning av sprickor i komponenter som arbetar vid temperaturer under gränstemperaturen för krypning. Sprickor bedöms med brottmekaniska metoder. Haverimekanismer som kan beaktas är plastisk kollaps och brott. Skademekanismer som kan beaktas är godstjockleksförtunnande mekanismer, miljöbetingad sprickbildning och utmattning.

R5

”R5-An assessment procedure for the high temperature response of structures” är en procedur för bedömning av kryputsatta komponenters respons. Proceduren ger vägledning i hur initiering och tillväxt av sprickor på grund av krypning och utmattning kan bedömas. Haverimekanismer som kan beaktas är plastisk kollaps, brott och krypbrott. Skademekanismer som kan beaktas är godstjockleksförtunnande mekanismer, utmattning och krypning.

BS PD6539

British Standards Published Document 6539 ”Guide to methods for the assessment of the influence of crack growth on the significance of defects in components operating at high temperatures” är en förenklad variant av R5 proceduren. Proceduren ger vägledning i hur initiering och tillväxt av sprickor på grund av krypning och utmattning kan bedömas. Haverimekanismer som kan beaktas är plastisk kollaps, brott och krypbrott. Skademekanismer som kan beaktas är godstjockleksförtunnande mekanismer, utmattning och krypning.

RCC-MR Appendix 16

RCC-MR Appendix 16 ”Design and construction rules for mechanical component of FBR nuclear islands” är en procedur för bedömning av initiering och tillväxt av sprickor på grund av krypning och utmattning. Haverimekanismer som kan beaktas är plastisk kollaps, brott och krypbrott. Skademekanismer som kan beaktas är godstjockleksförtunnande mekanismer, utmattning och krypning.

ASME III – NH

”ASME Boiler and pressure vessel code, Section III – NH, Division 1” är en amerikansk norm för dimensionering av komponenter som arbetar inom krypområdet. Haverimekanismer som kan beaktas är plastisk kollaps, brott, instabilitet och krypbrott. Skademekanismer som kan beaktas är godstjockleksförtunnande mekanismer, utmattning och krypning.

Nordtestmetod NT NDT010

Nordtestmetoden är en metod för bedömning av krypskador och rekommendationer på inspektionsintervall hos ångledningssystem. Metoden baseras på replikprovning. Haverimekanismer som kan beaktas är krypbrott. Skademekanismer som kan beaktas är krypning.

Nordtestprojekt 1306-96

Projektet är en omfattande utveckling av NT NDT010 där metoderna för utvärdering förfinats och bättre definierats.

BS PD6510

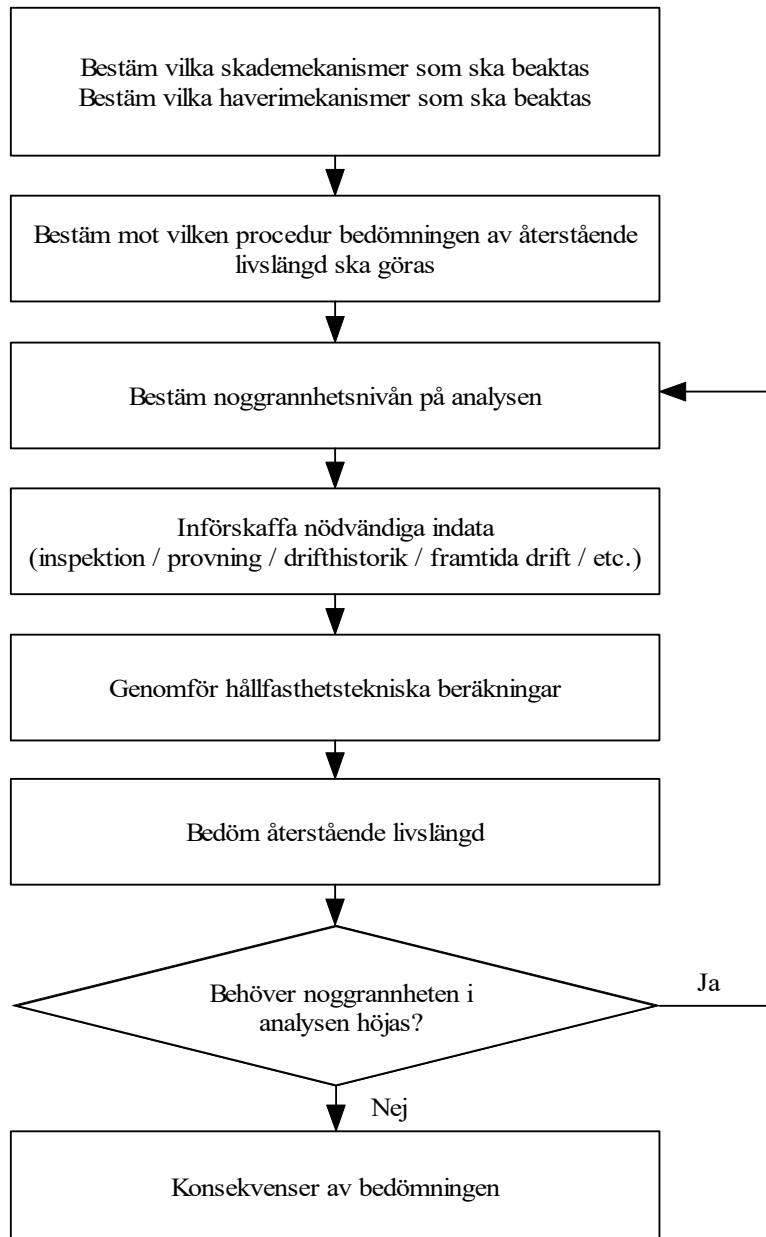
BS PD6510 beskriver ett antal metoder som kan användas för att bedöma återstående livslängd hos tryckkärlskomponenter i högttemperaturområdet. Dokumentet har några år på nacken (1983) men är fortfarande aktuellt i många stycken. Haverimekanismer som kan beaktas är kryp- och kryputmattningsbrott. Skademekanismer som kan beaktas är krypning och kryputmattning. Dokumentet behandlar även i viss mån mekanisk och termisk utmattning samt spänningskorrosionssprickning.

### API 579 Fitness-For-Service

”American Petroleum Institute Recommended Practice 579 Fitness-For-Service (FFS)” är ett omfattande verk för tillförlitlig bedömning av skador och defekter hos en anläggning. Utöver utmattning och krypning behandlas godsfortunning (pga. erosion eller korrosion) samt miljöinducerad sprickbildning inklusive väteförsprödning. FFS går ut på att bestämma om fortsatt drift av en komponent eller en anläggningsdel är möjlig ytterligare en driftperiod till nästa underhållsstopp. Eftersom intervallen mellan storstopp ofta är 6 år i petroleumindustrin är metoderna för FFS-analys besläktade med etablerade metoder för livslängdsanalys.

### NESC Thermal Fatigue Project EUR 22763 EN

Slutrapporten för NESC-projektet ”Development of a European procedure for assessment of high cycle thermal fatigue in light water reactors” är en guideline för hur termisk utmattning ska hanteras. Som projekttiteln antyder ligger erfarenheter av termisk utmattning från kärnkraftsindustrin som grund till projektet. De metoder man har tagit fram är dock till stora delar tillämpbara även på andra områden, som t.ex. kraftvärmeindustrin.



Figur 1.3-5. Flödesschema för bedömning av återstående livslängd.

Figure 1.3-5. Flow chart for remaining life assessment.

Flödesschema för bedömning av återstående livslängd för en mekanisk komponent framgår av Figur 1.3-5. Inledningsvis bestäms vilka skade- och haverimekanismer som ska beaktas i analysen. För att kunna fastställa dessa kan det bli aktuellt att genomföra en kompletterande mängd inspektion eller provning. Noggrannhetsnivån på denna bör inte vara högre än nödvändig. Den designkod eller procedur mot vilken bedömningen av återstående livslängd ska göras bestäms därefter. Valet styrs väsentligen av vilka skade- och haverimekanismer som ska beaktas, se Tabell 1.3-2. Den designkod som använts vid dimensioneringen av komponenten bildar oftast stommen. Noggrannhetsnivån på livslängdsanalysen bestäms enligt tidigare resonemang, jämför EPRIs koncept med Nivå I, II och III, se [avsnitt 1.3.4.1](#). Indata till livslängdsanalysen

består av designunderlag, drifthistorik, framtida drift, resultat från utredningar, inspektioner, provning, materialundersökningar, hållfasthetstekniska beräkningar, etc.

Bedömningen av återstående livslängd är i högsta grad en iterativ process där indata till analysen och analysen själv successivt förfinas tills dess att resultatet från bedömningen kan användas för beslut om fortsatta åtgärder i livslängdsarbetet. Ofta innebär detta att indata och analys förfinas tills dess att det kan demonstreras att komponentens återstående livslängd, med betryggande säkerhet, överstiger kommande driftintervall. Att fortsätta förfiningen av indata och analys förutsätter dock att den resulterande kostnaden inte kommer i närheten av kostnaderna för utbyte av den skadade komponenten.

En konditions- eller livslängdsanalys kan vara präglad av att vara mer kvantitativ eller mer kvalitativ. Vanligen eftersträvas kvantitativa analyser där återstående livslängd erhålls explicit. Sådana analyser möjliggör också att någon karakteristisk storhet som beräknats kan följas upp under den fortsatta driften för avstämning. Kvantitativa analyser kräver mer och noggrannare indata från den specifika komponenten jämfört med vad kvalitativa analyser kräver.

Kvalitativa konditions- och livslängdsanalyser kan ge värdefull information om exempelvis olika parametrars övergripande inverkan på en komponent. Att basera livslängdsarbetet med en anläggning enbart på denna typ av livslängdsanalyser är dock vanskligt.

#### 1.3.5 Konsekvenser av livslängdsanalysen

Det grundläggande resultatet från livslängdsanalysen bildar underlag för beslut om hur en komponent, ett system eller en anläggning kan tas i fortsatt drift. Tre huvudalternativ brukar nämnas i detta sammanhang: köra vidare, reparera eller byta ut (Run/Repair/Replace).

Det första alternativet, vilket är det vanligaste resultatet av en livslängdsanalys, innebär att komponenten tas i fortsatt drift utan att någon reparation genomförs. Detta alternativ kan innebära allt från att komponenten tas i drift utan någon åtgärd alls till åtgärder såsom att påträffad skada avlägsnas, kommande driftintervall reduceras, driftparametrar (exempelvis tryck och temperatur) sänks, cyklisk last begränsas till att vara konstant, kontinuerlig övervakning införs, etc. De senare delalternativen leder oftast till att kompletterande analyser av återstående livslängd måste göras.

En reparation bör uppfattas som ett väsentligt ingrepp i komponenten. Normalt avlägsnas påträffad skada genom slipning varefter urslipningen fylls upp genom svetsning. Noteras bör att en reparation sällan kan återställa en komponent till ursprungligt skick. Flera fall där komponenter reparerats har istället visat att den återstående livslängden bara marginellt kunnat ökas genom reparationen. Alternativet reparation bör således uppfattas som ett sätt att skjuta ett utbyte av en komponent fram till en mera optimal tidpunkt, exempelvis till ett längre stopp eller tills dess att komponenten har kunnat levereras. Vid reparationsarbeten är det viktigt att samtliga moment görs enligt vedertagen praxis och utav fackmän. I annat fall kan resultatet bli att komponentens livslängd drastiskt reduceras.

Svetsreparation efter avlägsnande av krypsprickor är förknippad med särskild problematik. Genom forskning, bland annat inom Värmeforsk, har dock förståelsen för krypbeteendet vid svetsreparation ökat väsentligt. I vissa fall är det nu möjligt att

utföra svetsreparationer som kan förväntas ha en relativt lång återstående livslängd. Vad man bör tänka på i fall av svetsreparation beskrivs Värmeforskrappport 766.

Utbyte av en komponent är det slutliga steget i en komponents livslängdscykel. För mindre vitala komponenter kan ofta utbytet ske så snart tillfredsställande säkerhet inte längre kan påvisas. För många komponenter kräver dock ett utbyte omfattande planering och en lång framförhållning. Arbetet med att byta ut en vital del såsom en turbin eller huvudångledning är mycket omfattande och kräver flera års framförhållning. För en ångdom tar det upp mot ett år från beställning till leverans. Endast genom en noggrann och kontinuerlig uppföljning av sådana system ges förutsättningar för en fungerande livslängdsstyrning.

Strategier för anläggningen och syftet med livslängdsarbetet har en övergripande inverkan på vilka konsekvenser resultaten från livslängdsanalysen får. Ett bedömningsunderlag som tekniskt sett borde leda till att en komponent exempelvis repareras kan i ljuset av strategier för anläggningen leda till att komponenten istället byts ut.

Den återstående livslängden kan väsentligt förlängas genom att identifiera orsaken till skadeproblem, t.ex. tubläckor, kartlägga skadans omfattning och byta ut skadade delar i tillräcklig omfattning samt genomföra åtgärder så att nya skador inte uppstår. En sådan strategi innebär också väsentligt förbättrad tillgänglighet. I exemplet ovan upplevs då inte bara tuberna med skadeproblem utan hela pannan ha erhållit en livslängds-förlängning.

I andra fall detekteras skador i samband med livslängdsanalysen som inom ett fåtal år skulle ha orsakat haverier. Genom utbyte eller reparation av skadade komponenter kan man undvika framtida produktionsbortfall.

Livslängdsanalysen ger en översikt av reinvesteringsbehovet av anläggningens olika system och komponenter under framtida driftförutsättningar. En utredning av effekten av livslängdsförlängande åtgärden ingår normal också samt vid vilken ungefärlig tidpunkt utbyten för respektive komponent kan förväntas bli nödvändiga med och utan möjliga åtgärder.

### 1.3.6 Uppföljning och erfarenhetsåterföring

Uppföljning av genomförda såväl som ej genomförda åtgärder i samband med livslängdsanalysen är viktig för avstämning av gjorda analyser och för återkopplingen till det fortsatta livslängdsarbetet. Resultat och erfarenheter från uppföljningen bildar således ett viktigt underlag till efterkommande livslängdsanalys.

Uppföljningsarbetet utgår från en uppföljningsplan som alltid ska ha upprättats som en del av livslängdsanalysen. Det är viktigt att denna uppföljningsplan är tydlig, att de storheter eller parametrar som följs upp är mätbara och att det klart framgår på vilket sätt uppföljda storheter eller parametrar ska utvärderas och varför.

Uppföljningen kan ta olika form beroende på ett flertal faktorer såsom:

- Hur kritisk den aktuella komponenten är; för processen, ur ett säkerhetsperspektiv,
- Vilka skademekanismer som är aktuella,
- Vilka haverimekanismer som är aktuella,
- Återstående livslängd med betryggande säkerhet,
- Drifttid till nästa stopp,

- Framtida drift; tryck, temperatur, cykling, bränslen etc. och
- Leveranstid och montagetid för en ny komponent.

För en komponent som är kritisk för processen eller kan bli kritisk ur ett säkerhetsperspektiv rekommenderas det att en eller flera karakteristiska storheter kontinuerligt (under drift) övervakas/mäts. Erhållna mätresultat ger då en möjlighet att kontinuerligt kunna stämma av gjorda analyser och genomföra beräkningar av skadeutveckling, återstående livslängd, etc., och därigenom direkt kunna vidta åtgärder såsom att ändra driftsätt, ändra driftperiodens längd, etc.

Hur uppföljningen av övriga komponenter och system ska genomföras får bedömas från fall till fall. Viktigt såväl för dessa komponenter är att resultaten från livslängdsanalysen beaktas, att en plan för uppföljningen upprättas och att resultaten från uppföljningen dokumenteras.

En viktig form av uppföljning som livslängdsanalysens resultat lägger grund för är rekommendationer till inspektionsintervall. De infogas i anläggningens underhållsplanering och uppdateras i samband med uppföljande kontroll.

Att föra tillbaka gjorda erfarenheter och erhållna resultat från livslängdsarbetet till den egna organisationen är viktigt av flera skäl. Drift- och underhållspersonal är de som arbetar närmast själva anläggningen. Det är också denna personalgrupp som levererar merparten av indata till livslängdsanalysen. För att kunna utveckla processen för arbetet med livslängdsfrågor är det således viktigt att denna personalgrupp görs delaktig. Resultaten från en livslängdsanalys kan vidare direkt påverka drift- och underhållspersonalen i deras dagliga arbete. Att de är delaktiga förändringarna är viktigt för motivationen till och framgången för livslängdsarbetet.

Den övergripande strategin för anläggningen och för hur livslängdsarbetet ska bedrivas bestäms på ledningsnivå. Att information om gjorda erfarenheter och resultat från livslängdsarbetet förs tillbaka till ledningen är därför viktigt så att området får fortsatt hög prioritet inom organisationen.

### 1.3.7 Rapportering

Vid planeringen av en livslängdsanalys måste det fastställas hur livslängdsanalysen skall rapporteras. Den rapportering som skall ske är dels den löpande delrapporteringen, dels slutrapporteringen. För delrapporteringen är det viktigt att fastställa med vilket intervall eller vilka tidpunkter projektet skall lämna delrapporter. Mottagare av rapporteringen skall också fastställas. Under projektet kan följande punkter behöva rapporteras:

- Tekniska problem

Då det gäller tekniska problem är det önskvärt att under arbetet rapportera om de metoder som använts för provning och mätning inte fungerat som tänkt, olika upptäckter som gjorts såsom slitage och sprickor eller annat som väsentligt påverkar livslängden, m.m.

- Ekonomi

Den ekonomiska rapporteringen handlar om hur ekonomin för livslängdsanalysen utvecklats d.v.s. om budgetar följs, om extra utgifter tillkommit, m.m.

- Tidsplan



Rapporteringen av tidsplaner skall innehålla hur livslängdsanalysen håller tidsplanen eller inte samt varför förseningar uppstått och vilka förändringar som behöver göras.

- Delrapporter av analysen

Delrapporter av en livslängdanalys bör innehålla de viktigaste fakta som framkommit ur livslängdsanalysen.

- Slutrapport av analysen

Slutrapporten skall innehålla all väsentlig kunskap som byggts upp under livslängdsanalysen. Rapporten skall ge underlag för de efterföljande besluten avseende investeringar eller annat som framkommit med inriktning på anläggningens drift och underhåll.

Slutrapporteringen av en livslängdsanalys skall göras mot bakgrund av mål och syftet med analysen. Vid slutrapportering av projekt rapporteras vanligtvis resultatet från projektet medan den kunskap och de erfarenheter om själva utförandet som har vunnits ofta försummas. Dessa erfarenheter är en viktig kunskap för framtida livslängdsarbete. I slutrapporten från en livslängdsanalys bör följande redovisas:

- resultat av analysen i förhållande till syftet och målet,
- fullständig dokumentation av den provning och de mätningar som utförts så att uppföljande och eventuell kompletterande provning och mätning samt framtida analyser kan utföras på ett rationellt sätt,
- de erfarenheter som erhållits och påverkar framtida livslängdsanalyser,
- de erfarenheter som erhållits och påverkar framtida underhåll,
- ekonomisk slutredovisning avseende kostnader för livslängdsanalysen, för reinvesteringar samt vilka besparingar som har kunnat göras.

Rapportering av livslängdsanalyser behandlas även i **avsnitt 1.11.4**.

## REFERENSER

Anderson T L 1995: Fracture Mechanics - Fundamentals and applications, Second Edition, CRC Press, Inc.

API579-1/ASME FFS-1, June 5 2007 (API 579 second edition).

ASME - Boiler and pressure vessel code, 1998; Section III, Division 1, ASME New York.

ASME - Boiler and pressure and vessel code. 1998; Section III, Division 1 - NH, Class 1 Components in Elevated Temperature Service, Rules for construction of nuclear power plant components, ASME, New York.

ASME - Boiler and pressure vessel code. 1998; Section VIII, Division 1, ASME New York.

ASME - Boiler and pressure vessel code. 1998; Section XI, Division 1, ASME New York.

British Standard Published Document PD 6493: Guidance on methods for assessing the acceptability of flaws in welded structures 1991 British Standards Institution, London.

- British Standard Published Document PD 6539: Guide to methods for the assessment of the influence of crack growth on the significance of defects in components operating at high temperatures. 1994. British Standards Institution, London.
- Dahlgren M, et al; NESC EUR 22 763 EN 2007
- EPRI CS-4778; Generic guidelines for the life extension of fossil fuel plants 1986, Principal investigators: W.P. McNaughton, R.H. Richman, C.S Pillar and L.W. Perry, Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA, USA.
- EPRI GS/EN-7536; Decision advisor for aging components: A feasibility study 1991, Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA, USA.
- EPRI GS-7064 Life optimization for fossil fuel power plants' 1990, Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA, USA.
- HIDA1995 Validation; Expansion and Standardisation of Procedures for High Temperature Defect Assessment, Project Programme of Brite/EuRam, Project BE 1702.
- Milne, I., Ainsworth, R.A., Dowling, A.R. and Stewart, A.T. 1988, Assessment of the integrity of structures containing defects, Int. J. Pres. Vessels Pip., Vol 32, pp. 3-104.
- NORDTEST Method 1991; NT NDT 010, Approved 1991-05.
- Nuclear Electric 1996, R5; An assessment procedure for the high temperature response of structures, Nuclear Electric plc Report R5 Issue 2, Rev 1, Berkely Nuclear Laboratories, Nuclear Electric plc, UK.
- RCC-MR 1985: Design and construction rules for mechanical component of FBR nuclear islands, AFCEN, Paris.
- Rörledningsnormer 1978; RN78 Tryckkärlskommissionen 1978,
- Selin G 1998, Projekthantering vid produktutveckling, Utgåva 2, Industrilitteratur AB.
- SINTAP 1995, Structural Integrity Assessment Procedures for European Industry, Project Programme of Brite/EuRam, Project BE 1426.
- SS-EN12952 2011; Vattenrörspannor och hjälpinstallationer, Europeisk Standard.
- SS-EN13445. 2013; Tryckkärl (ej eldberörda), Europeisk Standard.
- SS-EN13480 2012; Industriella rörledningar av metalliska material, Europeisk Standard.
- Tryckkärlsnormer 1987; TKN87, Tryckkärlskommissionen 1987.
- Viswanathan R 1989; Damage mechanisms and life assessment of high temperature components, ASM Internationals.
- Wrangensten Lars 1995; Livslängdsanalys av ångturbiner samt generell beskrivning av livslängdsområdet, Omvandlingsteknik 554, Stiftelsen för värmeteknisk forskning.
- Webster G A & Ainsworth R A 1994; High temperature component life assessment, Chapman & Hall, London.

## 1.4 STRATEGI OCH MÅL FÖR LIVSLÄNGDSANALYSEN

### 1.4.1 Strategi

För det övergripande livslängdsarbetet kan olika strategier väljas, till exempel:

- Återkommande planerade livslängdsanalyser med bestämda tidsintervall.
- Återkommande livslängdsanalyser föranledda av enskilda händelser.
- Planerade livslängdsanalyser för olika delsystem enligt ett schema.
- Tillståndsbaserade intervall för livslängdsanalyser, dvs. resultaten av en livslängdsanalys samt uppföljande inspektion och provning som analysen leder till avgör intervall till nästa analys.

Beroende på vilken strategi som väljs kommer kostnaderna för livslängdsarbetet och kostnaderna för att driva anläggningen att variera. Ett planerat livslängdsarbete enligt någon typ av schema ger lägre kostnader vid varje enskilt tillfälle än vid ett oplanerat livslängdsarbete. Dessutom höjs kompetensen inom organisationen och effektiviseringar görs. Livslängdsarbete ger ofta relativt höga startkostnader som dock väsentligen reduceras vid fortsatta livslängdsanalyser i det planerade livslängdsarbetet medan det oplanerade livslängdsarbetet är mer förknippat med att varje enskild analys blir en omstart som för med sig höga kostnader.

Strategin för varje enskild analys skall svara mot övergripande strategier för såväl organisationen som för livslängdsanalyser generellt. Strategier för en enskild livslängdsanalys kan till exempel vara att endast ett begränsat antal anläggningsdelar eller antal komponenter skall ingå i analysen.

### 1.4.2 Mål

Målen ger möjligheter för alla i organisationen att verka i samma riktning. Genom väl genomtänkta och väldefinierade mål ges möjligheter att få återkoppling på de insatser som görs samt att reagera på avvikelser.

För en livslängdsanalys skall tydliga mål sättas upp. Dessa mål är relaterade till organisationens mål. Tänkbara mål för en livslängdsanalys kan vara att ge svar på frågor av typen:

- Vilka restriktioner kan komma att krävas vid fortsatt drift av befintlig anläggning?
- Vilka modifieringar krävs för en fortsatt drift av anläggningen?
- Hur lång är den kvarvarande livslängden med nuvarande driftstrategi?
- Är det lönsamt att genomföra en ombyggnad av anläggningen för att kunna byta till ett alternativt bränsle?
- Är det lönsamt att ändra driftsätt från baslast till spetslast?
- Vilka besparingar kan göras genom att veta när det är dags att byta ut eller reparera olika delar i anläggningen?
- Är fortsatt drift av anläggningen under en bestämd tidsperiod lönsam i jämförelse med att bygga en ny anläggning?

Mål av olika slag kan ställas upp för anläggningar, målen kan var lång- eller kortsiktiga. Målet för en verksamhet skall beskriva var verksamheten skall befinna sig i en bestämd framtida tidpunkt. Målen är kopplade till de syften och den strategi som finns för verksamheten. Målen skall vara realistiska, mätbara och kommunicerbara.

Olika typer av anläggningsägare har olika mål för sina anläggningar. De mål som är mest intressanta för energianläggningar är tekniska, ekonomiska och miljömässiga mål. Det finns kopplingar mellan dessa.

### Tekniska mål

Tekniska mål kan vara krav för en anläggning:

- Prestandamål.
- Tillgänglighetsmål.
- Förändringar av bränslemixar.

### Miljömässiga mål

Tidigare har lagar och förordningar styrt miljöarbetet men sedan mitten av 1990 talet har även frivilliga miljöledningssystem såsom ISO 14001, ISO 9001, OHSAS 18001 och EMAS börjat införas. Dessa frivilliga system medför att verksamheten förbättras kontinuerligt och att mål ställs upp vad gäller miljöpåverkan från en verksamhet som erhållit certifiering. Detta gör det allt viktigare att de mål som sätts är mätbara. De miljörelaterade målen sätts för respektive anläggning och kan vara av typ:

- Minska utsläpp av en viss art till en bestämd nivå.
- Minska användningen av fossila bränslen till en viss nivå.
- Minska användning av kemikalier med bestämda kvantiteter.
- Minska emissionerna av växthusgaser (koldioxid, dikväveoxid, metan, ozon, freon och vattenånga).
- Öka användningen av förnyelsebara energikällor

### Ekonomiska mål

De ekonomiska målen är övergripande för anläggningen. Målen skall vara både långa och kortsiktiga. De ekonomiska målen kan vara:

- En vinst, på kort och lång sikt.
- Räntabilitet.
- En högsta belåning.

## **1.5 SKADEMEKANISMER**

### **1.5.1 Utmattning**

Med utmattning i metaller avses den strukturförändring som inträffar då materialet utsätts för cykliskt upprepade belastning som så småningom medför uppkomst av sprickor. Fortsatt cyklisk belastning medför tillväxt av sprickorna. Efter ett visst antal cykler har sprickorna blivit så stora att brott inträffar. Lasternas storlek och materialets brottseghet påverkar vid vilken sprickstorlek brott sker för en given konstruktion.

Utmattning kan ske genom rent mekaniska lastcykler. Andra typer av orsaker till utmattning är återkommande temperaturändringar i områden med tvära variationer i geometri och godstjocklek och på grund av nötning mellan två ytor. Korrosion och krypning kan inverka till att ge en reducerad utmattningshållfasthet.

Utmattningsbrott är utan tvekan den vanligaste haveriorsaken hos metalliska konstruktioner.

Uppkomsten av spricktillväxt genom utmattning förutsätter en tillräckligt stor variation av spänning och ett tillräckligt antal belastningscykler. Det finns även flera andra faktorer som påverkar utmattningsmotståndet:

**Last:** Konstant last som finns överlagrad cyklisk last:

**Temperatur:** Inte bara skillnaden i max och min-temperatur utan även hur snabbt temperaturväxlingen sker.

**Miljö:** Begreppet miljö innebär här en specifikation av korrosiva eller potentiellt korrosiva ämnen som finns i omgivningen samt i vilken koncentration dessa ämnen förekommer. Då korrosiva ämnen reducerar utmattningsmotståndet talar man om korrosionsutmattning.

**Ytfinhet:** Ytans ojämnheter har stor inverkan på initieringen av spricktillväxt.

**Spänningstillstånd:** Geometrier, anvisningar och godstjocklekar påverkar det lokala spänningstillståndet som i sin tur påverkar utmattningshållfastheten. Tryckspänningar kan motverka uppkomsten av sprickor.

**Material:** Olika material och olika materialtillstånd kan uppvisa stora skillnader i utmattningshållfasthet.

**Materialvolym:** Vid defekter kan en utmattningsspricka lättare initieras. Sannolikheten för att det ska finnas defekter i materialet ökar med volymen. Å andra sidan så kan en defekt i en liten materialvolym ha en större skadlig inverkan på utmattningshållfasthet såväl som hållfasthet i stort än i en stor.

Vid mekanisk utmattning skiljer man vanligen på högcykelutmattning (HCF) och lågcykelutmattning (LCF). Något förenklat kan man säga att spänningarna nominellt endast ger elastiska töjningar vid HCF. Vid LCF är spänningarna så pass höga att även nominella plastiska deformationer uppstår under belastningscyklerna. Det är praktiken svårt att definiera fasta gränser mellan de två typerna, men man talar ofta om högcykelutmattning då antalet cykler till brott överstiger 10 000 cykler.

#### 1.5.1.1 Högcykelutmattning HCF

HCF är den typ av utmattning som är mest känd och på det hela taget är den vanligaste orsaken till utmattningsbrott. Karaktäristiskt är att spänningsomfånget ( $\Delta\sigma$ ) i en belastningscykel kan vara betydligt lägre än både sträck- och brottgräns för att sprickor och haverier ska uppstå. Spänningsomfånget  $\Delta\sigma$  är den högsta minus den lägsta spänningen i en belastningscykel. Ett alternativt begrepp är spänningsamplitud ( $\sigma_a$ ) vilket innebär den högsta minus den lägsta spänningen i en belastningscykel delat med två,  $\sigma_a = \Delta\sigma/2$ .

En annan viktig faktor är medelspänning ( $\sigma_m$ ). En ökad medelspänning medför att en minskad spänningsamplitud krävs för att utmattning ska uppstå.

Typen av belastning påverkar utmattningshållfastheten. Exempel på belastningstyper med olika inverkan vid utmattningsanalyser är enaxlig belastning, böjning och vridning.

Vid mekaniska påkänningar uppstår utmattning i HCF-området ofta i roterande komponenter eller på grund av vibrationer i strukturer.

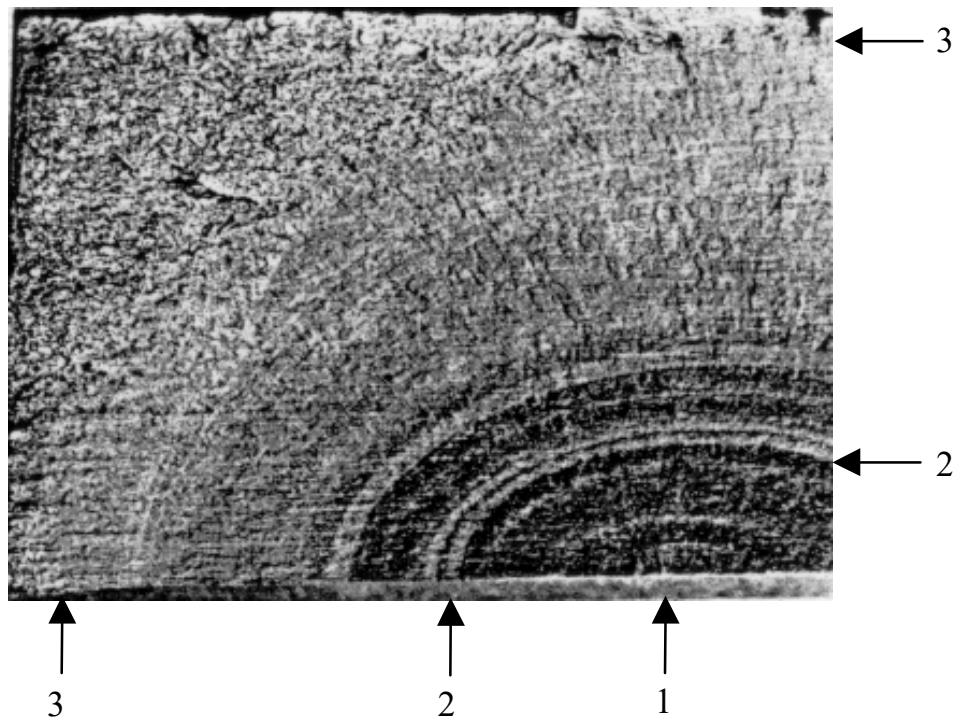
### Initiering och propagering

Utmattningssprickor initieras vid spänningskoncentrationer vid defekter eller heterogeniteter, till exempel inneslutningar, som i praktiken alltid finns i materialet i någon form. Även i ett mikroskopiskt homogent material finns det alltid heterogeniteter i form av störningar i atomkristallernas uppbyggnad, som till exempel dislokationer. Genom dislokationer bildas glidband som kan ta upp förskjutningar vid en belastning. Vid en cyklisk belastning uppstår irreversibla förändringar i dessa rörelser så att bestående små hack bildas på ytan som kan initiera sprickor. Spänningskoncentrationer förknippade med anvisningar i komponentens geometri är givetvis en ytterligare faktor som kan vara avgörande för sprickinitiering.

Då en spricka initierats av den cykliska belastningen är det vanligt men inte självklart att den propagerar vid fortsatt identisk belastning. De exakta mekanismerna för initiering och tidig tillväxt kan variera på många olika sätt beroende på alla de faktorer i till exempel belastning och material som kan spela in. Sedan inträder i de flesta fall en stabil spricktillväxt som efter en tid leder till instabil spricktillväxt och slutbrott.

Figur 1.5-1 visar ett typiskt utmattningsbrott. Sprickinitiering sker vid en förändring i materialet (1). Vid en cykliskt varierande last öppnas och sluts sprickan omväxlande. För varje cykel växer sprickan en liten bit. Det säkraste tecknet på utmattning är förekomsten av så kallade striationer. Dessa syns i mikroskop som en randighet i metallstrukturen vid förstoringar över ca 1000 gånger. Striationerna bildas vid sprickspetsen till följd av den plasticering som sker när sprickan öppnas och sluts under en lastcykel. Striationerna bildas tvärs sprickans utbredningsriktning. Eftersom en striation uppstår för varje lastcykel indikerar avståndet mellan dem tillväxthastigheten om lastfrekvensen är känd. I vissa material förekommer ingen striationsbildning och de kan vara svåra att se i andra. Korrosionsangrepp eller oxidation på brottytan gör ofta att eventuella striationer inte kan observeras.

Med blotta ögat ser man ibland ett utbredningsmönster med centrum i initieringspunkten (2). Dessa mönster kallas båglinjer eller rastlinjer. De bildas tvärs sprickans utbredningsriktning och uppkommer till följd av variationer i lasten eller frekvensen. Då stabil spricktillväxt inte längre kan upprätthållas blir tillväxten instabil och strax därpå sker ett momentant slutbrott (3).



Figur 1.5-1. Utmattningsbrott i stål (KTH 1995).

Figure 1.5-1. Fatigue failure in steel (KTH 1995).

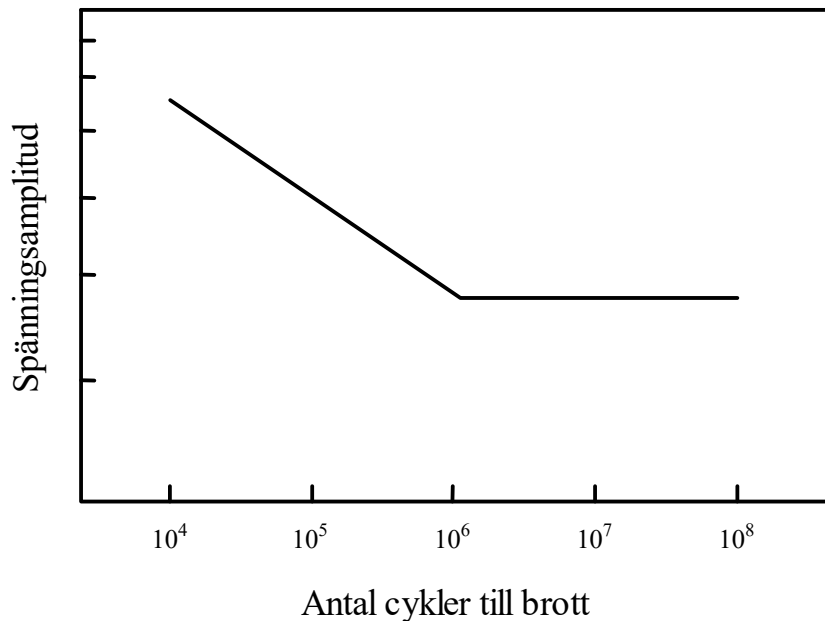
### Klassisk utmattningsfilosofi

För att åskådliggöra klassisk utmattningsfilosofi kan den så kallade Wöhlerkurvan användas, se Figur 1.5-2. Wöhlerkurvor (som även kallas S-N kurvor) tas fram experimentellt för olika material eller materialtillstånd vid olika typer av belastning och provstavsgeometrier. Kurvan beskriver spänningsamplituden som en funktion av antalet cykler till brott. Från figuren framgår det att en minskad spänningsamplitud till en början ger en större livslängd. Sedan ligger spänningsamplituden konstant vilket innebär att under denna spänningsamplitud är livslängden med avseende på utmattning obegränsad. Många material, däribland de flesta stål, uppvisar en sådan utmattningsgräns medan andra, som till exempel aluminium, inte gör det.

Utmattningsgränser finner man vid provning under konstant spänningsamplitud. Lastförhållanden med inslag av överlast är vanliga i praktiken. Om ett fåtal överlast inkluderar i provningen visar det sig att utmattningsgränsen försvinner, och kurvan fortsätter att luta nedåt om än svagt. Även korrosion i samverkan med utmattning resulterar ofta i att utmattningsgränser inte längre gäller, spänningsamplituden minskar kontinuerligt med antalet cykler till brott.

Utmattningsgränser används vanligen vid dimensionering för utmattning. Både sprickinitiering eller sprickpropagering omfattas i den information som man kan få ut från till exempel en Wöhlerkurva. Den klassiska utmattningsfilosofin kan inte skilja ut hur stor vardera delen är.





Figur 1.5-2. Wöhlerkurva, skalan är logaritmisk på båda axlarna.

Figure 1.5-2. Wöhler curve, the scale is logarithmic on both axes.

#### Brottmekanisk utmattningsfilosofi

Den brottmekaniska utmattningsfilosofin utgår från att defekter finns i materialet och att en sprickinitiering finns från början. De analyser som görs omfattar att avgöra kritiska defektstorlekar som kan orsaka sprickpropagering och att bedöma tillväxthastigheter av sprickor i fall av sprickpropagering.

De brottmekaniska analyserna baseras på att mekanisk påkänning vid en sprickspets beskrivs av spänningsintensitetsfaktorn,  $K$ . Man kan studera spänningsintensiteten kring en defekt, anvisning eller en sprickspets. Ett kritiskt värde av spänningsintensiteten för spricktillväxt,  $K_c$ , är beroende av belastningstyp, miljö, temperatur, materialets mikrostruktur, töjningshastighet, och spänningstillstånd.

Vid utmattningsanalys där belastningen är cyklisk analyserar man omfånget av spänningsintensiteten under en lastcykel,  $\Delta K = (K_{\max} - K_{\min})$ . En mycket betydelsefull parameter är det så kallade tröskelvärdet för omfånget av spänningsintensiteten,  $\Delta K_{th}$ . Under tröskelvärdet förväntas inte spricktillväxt kunna ske. I kapitlet 1.8 Spännings- och brottmekaniska analyser (**i avsnitt 1.8.2.2**) och **1.7.6 Brottmekanisk provning** behandlas detta ämne ytterligare och där diskuteras bland annat tillväxtlagar för utmattningsprickor.

#### Förekomst i energianläggningar

HCF kan sägas vara allmänt förekommande i energianläggningar. Många gånger är det vibrationer i olika utrustningar och komponenter som orsakar denna typ av skador. Inte minst komponenter i turbiner kan drabbas. I kraftvärmeverk är det emellertid andra former av utmattningsanalys, till exempel termisk utmattningsanalys, kryptutmattningsanalys och korrosionsutmattningsanalys som i många anläggningar utgör de största problemen.

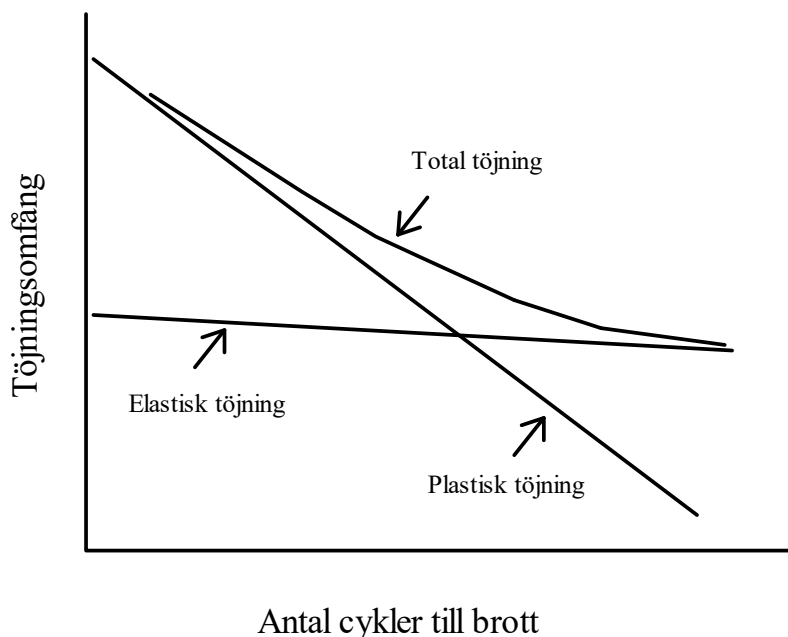


### 1.5.1.2 Lågcykelutmattning LCF

Vid lågcykelutmattning ingår plastiska deformationer nominellt i belastningscykeln. Om spänningsomfånget ( $\Delta\sigma$ ) är konstant för varje cykel och materialet deformationshårdnar, vilket är vanligt, så kan den pålagda spänningen efter ett antal cykler endast åstadkomma elastiska deformationer (se **Figur 1.7-4 i kapitel 1.7.4**). Eftersom frekvensen av cyklingen vid LCF normalt är låg i jämförelse med vid HCF innebär detta att livslängden i princip borde vara mycket lång för ett sådant belastningsfall. Det är den också många gånger om de plastiska deformationerna är små från början.

I många verkliga belastningsfall är dock belastningen vid LCF töjningsstyrd. Detta innebär att töjningsomfånget ( $\Delta\epsilon$ ) är konstant under cyklingen. De spänningar som krävs för att uppnå detta töjningsomfång kan variera. Variationen är materialberoende och kan även vara temperaturberoende. Mjuknande, hårdnande eller konstanta nivåer kan uppträda.

Figur 1.5-3 visar schematiskt hur töjningsomfångets storlek under cyklingen inverkar på antalet cykler till brott,  $N_f$ . Av figuren framgår det att  $N_f$  ökar då töjningsomfånget minskar. Töjningen består av en elastisk och en plastisk del. Då den totala töjningen sjunkit till att bara vara elastisk blir inverkan av töjningsomfånget på  $N_f$  relativt litet.



**Figur 1.5-3.** Töjningsomfång som funktion av antal cykler till brott. Det är logaritmiska skalor på båda axlarna.

**Figure 1.5-3.** Strain range versus number of cycles to failure. There are logarithmic scales on both axes.

Eftersom töjningsstyrda förlopp orsakar de flesta LCF-skadorna är nästan all LCF-provning töjningsstyrd. Det allra vanligaste är att utföra provningen med mekaniska töjningar (förskjutningsstyrd last), många gånger även om den ska simulera termisk utmattning, se vidare **avsnitt 1.7.9 Termisk utmattningsprovning**. De tryckskillnader som uppstår vid starter och stopp kan på vissa komponenter, som till exempel

ångdomar, orsaka en mekanisk lågcykelutmattning. Störst betydelse har lågcykelutmattningen där termisk cykling eller en kombination av termiska och mekaniska påkänningar orsakar skadorna, ofta i samverkan med krypning. Detta behandlas vidare i avsnitten nedan om Termisk utmattning och Kryputmattning.

#### 1.5.1.3 Termisk och termomekanisk utmattning

Termisk utmattning (TF) kan uppstå då komponenten utsätts för termisk cykling som till exempel vid starter och stopp. Ångkylning och lastväxlingar i panna är andra exempel på orsaker till termisk utmattning. Påkänningarna härrör från materialets utvidgning och kontraktion då temperaturen stiger respektive sjunker. Om den termiska utvidgningen/kontraktionen inte är homogen uppstår termiska spänningar, t.ex. vid lokal kylning som medför lokal kontraktion och dragspänningar mot omgivande material. Snabb uppvärmning (eller kylning) av geometrier där tjockt gods tvärt övergår till ett tunt medför att det tar längre tid för det tjockare godset att erhålla den högre (eller lägre) temperaturen. Under tiden det är temperaturskillnad mellan tjockare och tunnare gods uppstår termiska spänningar i gränsområdet. Antalet termiska cykler under en komponents livslängd beror helt och hållet på temperaturomfånget och hur snabbt temperaturen växlar. En del termiska utmattningsbrott är förknippade med stora temperaturvariationer medförande plastiska töjning i kritiska områden (se även [avsnitt 1.5.1.2 Lågcykelutmattning](#)). Temperaturvariationer som kan ge termisk HCF är t.ex. intermittent vätning av en het yta med ett kylmedel samt horisontella vattenrör med temperaturgradient där nivån mellan varmare vatten i den övre delen och kallare vatten i den undre alternerar frekvent.

Geometrin i en komponent kan vara sådan att termiska transienter uppstår vid cyklingen. Ett klen parti svalnar hastigare än ett grovt. Materialet i övergången mellan det klenare och det grövre godset tvingas då till deformation på grund av den hastigare kontraktionen i den klenare delen. Töjningarna blir större ju skarpare en övergång är, plastiska töjningar i storleksordningen 1 % är vanliga nivåer. Snabbstopp kan vara förknippat med betydligt större effekter.

Den termiska cyklingen är vanligen töjningsstyrd. Cyklisk mekanisk påkänning tillkommer samtidigt, i många fall. Vid provning av material är det komplicerat att simulera de termomekaniska utmattningsförloppen under kontrollerade former. Det är därför vanligt att hålla en konstant temperatur och utföra en mekanisk cykling, vilket kallas LCF-provning. Utforskning av skademekanismer är i många fall baserat på sådan provning.

Provning där både last och temperatur cyklas kan utföras för att bättre simulera verkliga förhållanden. Detta kallas termomekanisk utmattning (TMF). Det har då visat sig att antalet cykler till brott reduceras för flera material i jämförelse med LCF-provning medan andra uppvisar små skillnader. Skillnaderna beror på att för många material är deformationsmekanismerna vid en konstant högre temperatur inte samma som vid provning där deformation vid lägre temperaturer även ingår. LCF-data kan alltså i vissa fall vara icke konservativa. Det gäller främst mer avancerade material där av utskiljningar av legeringsämnen av olika typer är avgörande förhållfastheten, se även [avsnitt 1.7.9 Termisk utmattningsprovning](#). Exempel som beskriver skademekanismer vid TMF för material i gasturbiner ges i [kapitel 2.3.2 Gasturbiner](#).

Vid termisk och termomekanisk utmattning kan skadeutvecklingen uppdelas i:

- i) Förändringar i mikrostrukturen som orsakar permanent skada.
- ii) Initiering av mikrosprickor.
- iii) Tillväxt och sammanväxt av mikrosprickor till makrosprickor.
- iv) Tillväxt av makrosprickor.
- v) Brott.

Mekanismerna som orsakar skadorna vid förhöjda temperaturer beror på temperaturen, spänningsnivån och omgivningen. Dessa mekanismer omfattar cyklisk glidning i glidband, kavitetsbildning i korngränser, korngränsglidning, decohesion (lossnande) av inneslutningar från det omgivande materialet och oxidation. Kavitetsbildning och korngränsglidning är även kännetecknande för krypning. Krypning och oxidation i samband med cyklisk belastning kan reducera utmattningshållfastheten.

En start följs av en viss drifttid fram till nästa stopp. De spänningar som uppkommit i de kritiska områdena på grund av temperaturstegringen vid en start vill under drifttemperatur avta men i det töjningsstyrda förloppet medges ingen ändring av töjningen i detta läge. Vid höga temperaturer blir emellertid ett spänningsavtagande möjligt på dessa villkor genom krypprocesser, se vidare **avsnitt 1.5.2 krypning**. Detta kallas kryprelaxation. De skador som uppstår under krypning och kryprelaxation kan samverka med utmattningskadorna. Detta beskrivs närmare i **avsnitt 1.5.1.4 kryputmattning**.

Införs en hålltid, där materialet får tid på sig att kryprelaxera, i materialprovningen blir resultatet ofta ett reducerat antal cykler till brott och krypning kan alltså bidra till detta. Mellan starter och stopp ges även tid för oxidation vilket kan påskynda sprickinitiering och sprickpropagering. Figur 1.5-4 visar spetsen av en LCF-spricka i mikrostrukturen av ett låglegerat stål. Sprickan löper huvudsakligen genom kornen (transkristallint) i mikrostrukturen och är oxidfylld (grå områden i sprickan). Termiska utmattningsprickor är generellt transkristallina i ferritiska låglegerade stål. I austenitiska stål (hög kromhalt) är interkristallina sprickor (propagering i korngränser) vanligare.

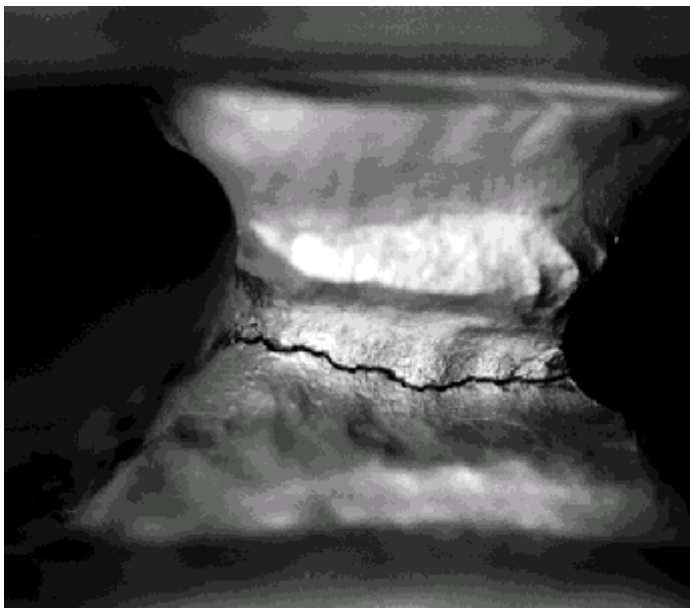
Det finns många förslag till detaljerna om hur oxidationen understödjer sprickbildningen. För några material har arbeten utförts för att kartlägga oxidationens och krypningens inverkan på antalet cykler till brott med tiden och temperaturen. En uttömmande litteraturstudie på detta ges i ref. (Erikson 1979).

Termisk utmattning är vanligt förekommande i till exempel turbinkomponenter, ånglådor, ventilhus på ångledningar, tuber och tubinfästningar i olika system i pannor och ångkylare. Figur 1.5-5 visar en termisk utmattnings-spricka i inloppsdelen på en sidoplatta till en ångturbin.



Figur 1.5-4 . LCF-spricka i ett 0.5Cr0.5Mo0.25V stål provat vid 550°C, 1000x förstoring.

Figure 1.5-4. LCF crack in a 0.5Cr0.5Mo0.25V steel tested at 550°C, 1000x magnification.



Figur 1.5-5. Termisk utmattningspricka i inloppsdel på en sidoplatta till en ångturbin. [ALSTOM Power]

Figure 1.5-5. Thermal fatigue crack in the inlet part of a steam turbine. [ALSTOM Power]

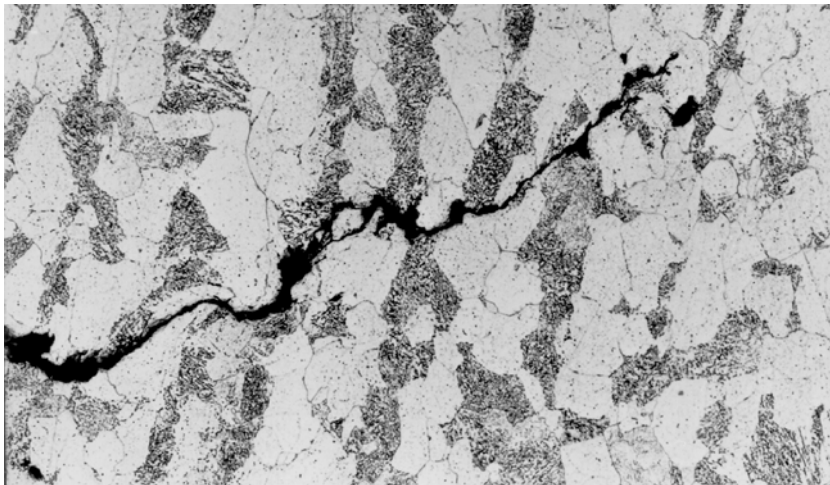
#### 1.5.1.4 Kryputmattning

Kryputmattning innebär att ett material utsätts för både krypning och utmattning vilket ofta ger mer skadliga effekter än var och en för sig. Typen av utmattning är termisk utmattning (TF), termomekanisk utmattning (TMF) eller lågcykelutmattning (LCF) från termiska och/eller mekaniska påkänningar (se [avsnitt 1.5.1.2](#)). Krypningen kan vid kryputmattning bestå både av krypdeformation och av kryprelaxation ([avsnitt](#)

**1.5.2).** Kryputmattning brukar ingenjörsmässigt ofta hanteras med linjära delskad modeller vilka inte alltid finner stöd av provresultat. Sådana resultat visar i vissa fall att de två typerna av skada utvecklas ganska oberoende av varandra fram till brott där endera mekanismen har varit avgörande medan andra fall visar en samverkan som leder till relativt korta livslängder. Material samt vanligtvis även tider, temperaturer och utmattningsparametrar inverkar på hur stora de samverkande effekterna blir.

Utöver linjära delskad modeller finns det även ett antal mer avancerade modeller för att förutsäga livslängden vid kryputmattning. Det finns två saker som man bör vara observant på vid användning sådana. Först ingår vanligen materialkonstanter som ger stort utslag på resultatet och det är därför viktigt att det är det riktiga materialet och att det praktiska fallet överensstämmer med de förutsättningar under provningen vid vilka konstanten tagits fram. Sedan är det inte alltid klarlagt om det är krypning eller oxidation som kan ge samverkande effekter med utmattningen, se **avsnitt 1.5.1.3**. Det gäller särskilt vid materialprovning av ferritiska stål i luft. Av kostnadsskäl är det ovanligt att provning sker med skyddsgas.

Vid kryputmattning kan de olika skademekanismerna bidra till skadans uppkomst och tillväxt på olika sätt. Krypprocesser kan underlätta initiering och propagering av utmattningsprickor. Cykliska laster kan påskynda en utveckling av krypkaviteter till mikrosprickor och makrosprickor på olika sätt. Ett tydligt exempel av samverkande effekter är ett material där utmattningsprickan tillväxer transkristallint (tvärs korngränser) vid enbart utmattning men propagerar interkristallint (i korngränser) vid inslag av krypning. Figur 1.5-6 visar en spricka med inslag av både transkristallin och interkristallin tillväxt vid kryputmattning.



**Figur 1.5-6.** Spricka i ett 1Cr0.5Mo stål som LCF-provats med hålltid (kryprelaxation) vid 550°C, 600x förstoring. [Institutet för Metallforskning]

**Figure 1.5-6.** Crack in a 1Cr0.5Mo steel LCF-tested with holding time (creep relaxation) at 550°C, 600x magnification [Swedish Institute for Metals Research]

### *Korrosionsutmattning*

Korrosionsutmattning (corrosion fatigue, CF) räknas ofta som en form av miljöinducerad sprickbildning. Övriga former ges i **avsnitt 1.5.4**.

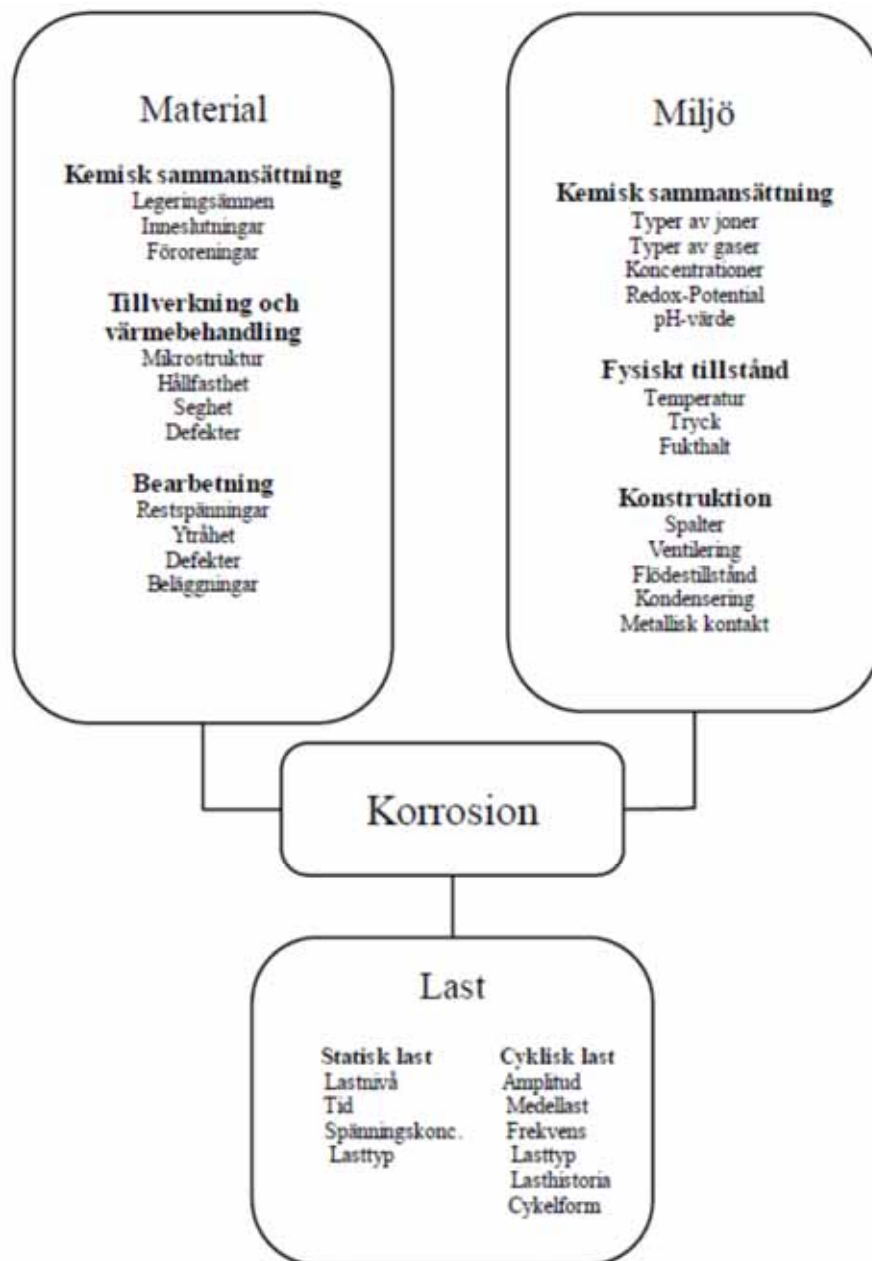
Korrosionsutmattning uppstår genom en samverkan mellan ett korrosionsangrepp och cykliska spänningar. Sprickor orsakade av korrosionsutmattning uppstår vid en lägre spänning eller efter ett mindre antal cykler än vad som skulle ha behövts utan den korrosiva miljön. Korrosionsutmattning är inte kopplat till en tydlig utmattningsgräns vilket är fallet för många material vid ren utmattning. Korrosionsutmattning är därför svårare att förutsäga än den rena utmattningen.

Rent allmänt avgörs risken för korrosionsutmattning av den aktuella kombinationen av material och lokal miljö, samt av belastningen under normal drift och under transienter i driften. Antalet inverkan faktorer är många och de viktigaste visas schematiskt i Figur 1.5-7. Korrosionsutmattning är inte begränsad till specifika korrosionsmedier som vid spänningskorrosionssprickning, se **avsnitt 1.5.4.1**, utan kan uppträda i många typer av miljöer. I energianläggningar är vatten den vanligaste miljön där korrosionsutmattning förekommer.

I princip kan även ren luft betraktas som en aggressiv miljö. I många fall har luft en betydande inverkan på skadebildningen, särskilt vid förhöjd temperatur. I praktiken är det dock ofta utmattning i luft som utgör referens till andra miljöer då man talar om korrosionsutmattning.

Begreppet korrosionsutmattning omfattar utöver elektrokemiska korrosionsprocesser även cykliska spänningar i samverkan med väteförsprödning i gasmiljö. De gasformiga medier som främst ger upphov till väteförsprödning, till exempel H<sub>2</sub> och H<sub>2</sub>S, är dock inte vanligt förekommande i energianläggningar. Väteförsprödning i samverkan med utmattning kan dessutom förekomma i vattenmiljö där vätgas kan utvecklas vid extremt låga syrehalter. Upptagningen av väte i metallen, vilket ger den försprödande effekten, underlättas då i spetsen av en utmattningsspricka på grund av att ren metallyta frigörs från oxidfilm då oxidfilmen spricker (och återbildas) vid cyklingen. Korrosionsutmattning i samband med väteförsprödning har observerats i matarvattentankar (Sund 1998).





Figur 1.5-7. Inverkande faktorer på korrosionsutmattning (Wik 1998).

Figure 1.5-7. Influencing factors on corrosion fatigue (Wik 1998).

Svårigheterna med att kvantifiera den lokala miljön och den lokala belastningen gör att det är svårt att kvantifiera risken för korrosionsutmattning i en speciell anläggning. Små variationer kan medföra att korrosionsutmattning uppträder till synes slumpartat.

En orsak till att korrosionsutmattning uppstår är att föroreningar kan anrikas lokalt i vissa områden. Ett exempel på detta är i gränsområdet mellan torr och fuktig ånga i turbiner, den så kallade Wilsonlinjen. I sådana miljöer kan man skilja på två olika typer av korrosionsutmattning: passiv och aktiv. Den passiva formen uppkommer i milda

miljöer och kan ofta karaktäriseras att materialet fortfarande har en utmattningsgräns vilken reduceras måttligt av miljöns inverkan.

Den aktiva korrosionsutmattningen uppstår i aggressiva miljöer som orsakar lokala korrosionsangrepp i form av frätgropar. Frätgroparna utgör initieringspunkter som ger spänningskoncentrationer och förkortar inkubationstiden för sprickpropagering. De korrosiva ämnena kan dessutom koncentreras i frätgroparna vilket kan leda till ett hastigare utmattningsförlopp. Utmattningshållfastheten kan därför reduceras drastiskt.

Mekanismer för initiering och propagering av korrosionsutmattningsprickor sammanhänger med nedbrytning av metallens passiverande täcksikt som frilägger icke passiverad metallyta. Detta kan ske genom en lokal anrikning av aggressiva joner vid defekter i oxidfilmen. Oxidfilmens nedbrytning kan understödjas av att den spricker av de cykliska spänningarna.

De sprickor som uppkommer vid korrosionsutmattning går oftast transkristallint, det vill säga rakt igenom kornen, men kan också gå interkristallint, det vill säga följa korngränserna. Vid korrosionsutmattning i kolstål och låglegerade stål förekommer ofta flera sprickor tillsammans i kolonier och att sekundärsprickor bildas kring en huvudspricka, medan rena utmattningsprickor generellt är raka, ogrenade och relativt breda. (Mattsson 1987, Wranglén 1970). Raka och ogrenade sprickor förekommer även vid korrosionsutmattning, särskilt i rostfria stål (Metals Handbook 1986). Det händer också att korrosionen, som haft en betydande inverkan på sprickinitieringen, inte inverkar speciellt på sprickpropageringen. Till exempel kan tillräckligt höga frekvenser av den cykliska belastningen innebära att de aktuella korrosiva processerna inte hinner verka och propageringsdelen av korrosionsutmattningen är densamma som vid den rena utmattningen.

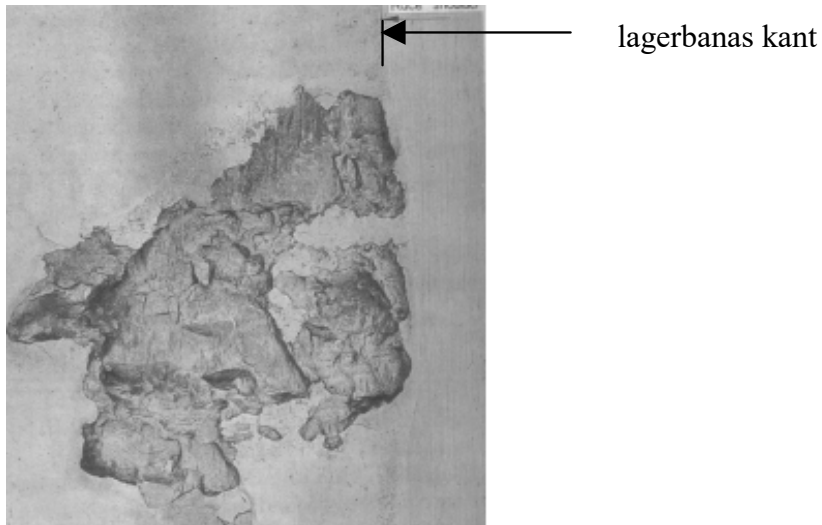
För brottmekaniska analyser av korrosionsutmattningsprickor finns modeller där miljöinverkan ingår. Mekanismerna för miljöinverkan hanteras inte sällan på samma sätt som för spänningskorrosionssprickning och adderas till effekterna av den rena utmattningen. Sådana modeller kan ha viss tillämpning på höghållfasta material men bör undvikas på duktila (Suresh 1992).

I princip kan man minska riskerna för korrosionsutmattning med åtgärder riktade mot endera mot de tre huvudfaktorerna; material, miljö eller belastning.

#### 1.5.1.6 Kontaktutmattning

Kontaktutmattning medför ytskador vanligtvis gjorda av kul- eller rullager, se exempel i Figur 1.5-8. Denna typ av skador kan också återfinnas i kugghjul, kamaxlar, ventiler och växlar. Kontaktutmattning har hittats på metallegeringar och på keramer. I ett kraftverk förekommer kontaktutmattning i ventiler (till exempel kägelventiler), kullager och växellådor.



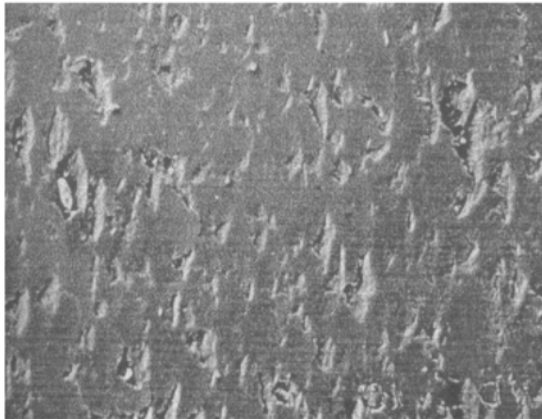


**Figur 1.5-8. Utbredd urflisning nära ett kullagers lagerbanekant (ASM 19 1996).**

**Figure 1.5-8. Multiple spalls near a race shoulder (ASM 19 1996).**

Vanligtvis rör sig vid kontaktutmattnings en yta i en rullande rörelse över den andra. Kontaktytan och det rullande elementets rörelse producerar en under ytan alternerande skjuvspänning. Under ytan kan då en plastisk deformation byggas upp tills en spricka bildas. Sprickan växer upp till ytan och en grop bildas där. Då det bildats gropar på ytan i ett lager börjar det att föra oljud och får en ojämn gång. Fortsatt drift i detta tillstånd kan leda till skador och haveri.

En form av kontaktutmattnings kallas punktutmattnings och återfinns i lager. Ett exempel på en punktutmattningskada visas i Figur 1.5-9. Det bildas små gropar (kaviteter) som kan breda ut sig över hela den berörda ytan. Orsaken är att plastisk deformation leder till tillplattning av skrovligheter på ytan. Det skyddande oxidskiktet slipas bort och man får en polerad yta. Ytan blir starkt deformerad och vid fortsatta spänningscykler minskar materialets formbarhet och mikrosprickor bildas. Mikrosprickorna ökar till antal och växer och till slut bildas punktkaviteter. Detta är oftast ett resultat av en för tunn smörjolfilm eller för hög ytråhet och ibland för hög last. För att åtgärda problemet kan man förfina ytans ytskikt, reducera lasten eller se till att en få tillräckligt elastohydrodynamisk film, till exempel genom att minska temperaturen eller byta smörjolja. Det enda som oftast är möjligt att göra i en befintlig komponent är att förbättra smörjningen.



**Figur 1.5-9. Punktutmattning i ett rullagers yttersta bana (ASM 19 1996).**

**Figure 1.5-9. Micro pitting outer race of a roller bearing (ASM 19 1996).**

#### 1.5.1.7 Friktionsutmattning

Friktionsutmattning är en process som inträffar i kontaktytan mellan två material som är belastade och utsätts för rörelser med en mycket liten amplitud som till exempel skjuvrörelser vid vibrationer. Skadan börjar med en lokal adhesion (vidhäftning, hopsvetsning) mellan de mötande ytorna och utvecklas när partiklar nöts bort från ytorna. Den påverkade ytan får gropar och fåror och de bortnötta partiklarna kan sedan reagera med luft eller annan korrosiv miljö.

Nötningsprocessen kan accelereras av korrosion (oxidation i fuktig atmosfär har vanligen den största betydelsen). Oxidskiktet på en metall som byggs upp i luft eller fuktig atmosfär, slits då det bringas i kontakt med ett annat fast material under inverkan av de små skjuvrörelserna. När oxidskiktet avlägsnats kommer det att återuppbyggas, till vilket det åtgår mera metall, och man kan därför tala om korrosion. Oxiden som slits bort ger upphov till hårda partiklar som ytterligare bidrar till slitaget. På ytan syns ibland små högar av oxid. Hos järnlegeringar bildas typiskt ett rödaktigt pulver av  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  runt området. På aluminium kan ofta svarta oxider observeras. De små skjuvrörelserna kan ge upphov till nötning även utan oxidationsinslag. Oxidationsmekanismerna underlättar men är inte nödvändiga för uppkomsten av friktionsutmattning.

Friktionen kan så småningom leda till att en liten spricka initieras och tillväxer av de växlande nötningspåkänningarna, så kallad friktionsutmattning. Denna spricka avstannar vid ett djup där påkänningarna från den växlande nötningen inte längre kan driva sprickan vidare. Detta sprickdjup beror bland annat på friktionen och uppgår till i storleksordningen halva kontaktytan för vissa studerade fall (ASM 19 1996). Det rör sig alltså om små djup på bråkdelar av en millimeter. Djup på ca 0,25 mm har observerats (Suresh 1999).

Om andra cykliska spänningar föreligger kan sprickan sedan fortsätta att propagera om friktionsutmattningssprickans storlek har nått kritisk storlek för vidare propagering med dessa spänningar. Haverier orsakade av friktionsutmattning förekommer i till exempel rotor och skovelfästningar i ångturbiner. Vid utmattning med bakomliggande friktionsutmattning kan ett materials utmattningsgräns reduceras med

så mycket som 50-70 %. Sprickor som uppstår är oftast gömda av de två komponenterna som är i kontakt och är därför svåra att upptäcka.

Friktionsutmattning kan förhindras genom att eliminera eller minska glidningen mellan kontaktytorna. Friktionskoefficientens förhållande mellan de två material som är i kontakt med varandra har en stor inverkan (ASM 19 1996).

#### REFERENSER

ASM Handbook Vol 19. 1996. pp. 321-330.

Erikson T. 1979. Review of oxidation effects on cyclic life at elevated temperature, Canadian Metallurgical Quarterly, Vol. 18, pp 177-195.

Mattson E. 1987. Elektrokemi och korrosionslära, Bulletin 100.

Korrosionsinstitutet, Stockholm.

Metals Handbook, Vol. 11 1989. 9th ed., American Society for Metals.

KTH 1995. Kompendium i mekanisk metallografi, Institutionen för metallografi, Kungliga tekniska högskolan.

Sund G., Andersson M. 1998. Sprickbildning hos kolmangan- och mikrolegerade stål i pann- och matarvattenmiljö, Värmeforskrapport 639.

Suresh S. 1992 Fatigue of materials Cambridge Solid State Science Series.

Suresh S. 1999. Fatigue of materials, Cambridge Solid State Science Series, 2nd ed.

Wik A, Tavast J. 1998. Fältprovning med skovlar med förbättrad resistans mot korrosionsutmattning - del 1, M3-609, Värmeforsk Orientering 110.

Wranglén G. 1970. Korrosionslära, Institutionen för teknisk elektrokemi och korrosionslära, KTH, Stockholm.

### 1.5.2 Krypning

Krypning kräver en tillräckligt stor last. Då lasten är tillräckligt stor för att krypning skall uppträda så är krypning en tidsberoende deformationsprocess som slutligen leder till brott. Det kan definieras som en "långsam plastisk deformation förknippad med tidsförlängning vid en konstant last" (Boyle 1983). Den tidsberoende deformationsprocessen är termiskt aktiverad och därför har temperaturen en avgörande betydelse för krypningens hastighet. Tiden till brott vid en konstant last är kortare vid en högre temperatur än vid en lägre. Lasten har en liknande inverkan: tiden till brott är kortare för en högre last än för en lägre vid en konstant temperatur.

Vid tillräckligt låga temperaturer och spänningar blir krypdeformationen försumbar för hållfastheten i jämförelse med den statiska hållfastheten. Detta kan åskådliggöras då spänningar och temperaturer för en given krypbrottstid jämförs med materialets sträckgräns. Figur 1.5-10 visar två kurvor. En på sträckgräns som funktion av temperatur och den andra visar krypbrottgränsen för en given brottid, till exempel

100 000 timmar, som en funktion av temperaturen. Krypning blir dimensionerande vid temperaturer då krypbrottgränsen är lägre än sträckgränsen. Brytpunkten är vid punkten A i figuren.

Figur 1.5-10. Sträckgräns och krypbrottgräns för en konstant tid som funktion av temperatur.

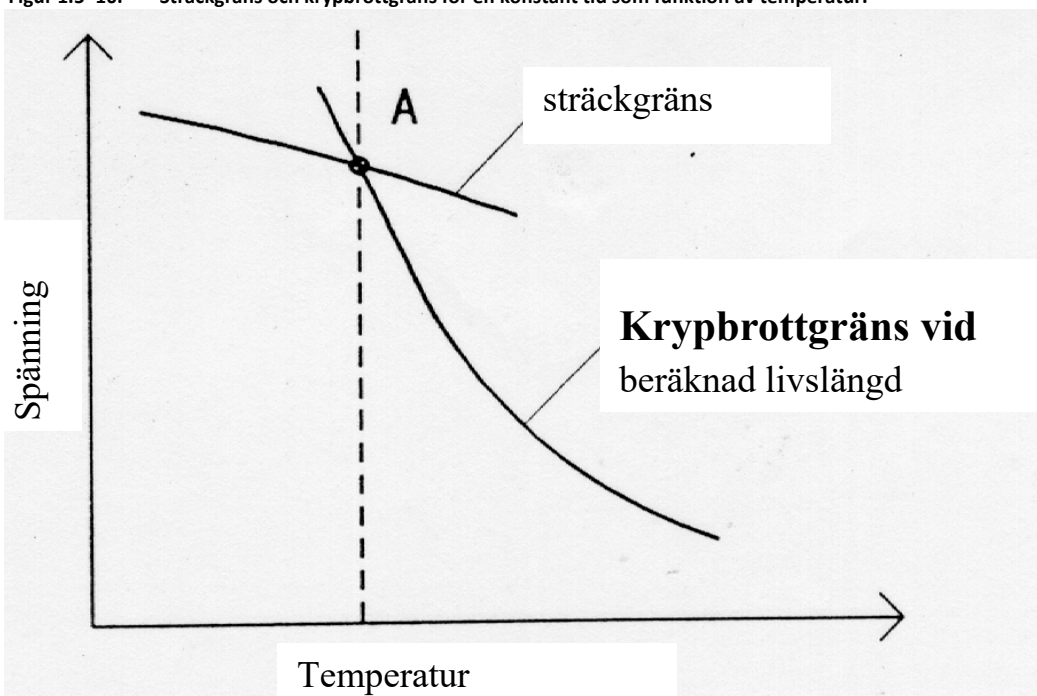


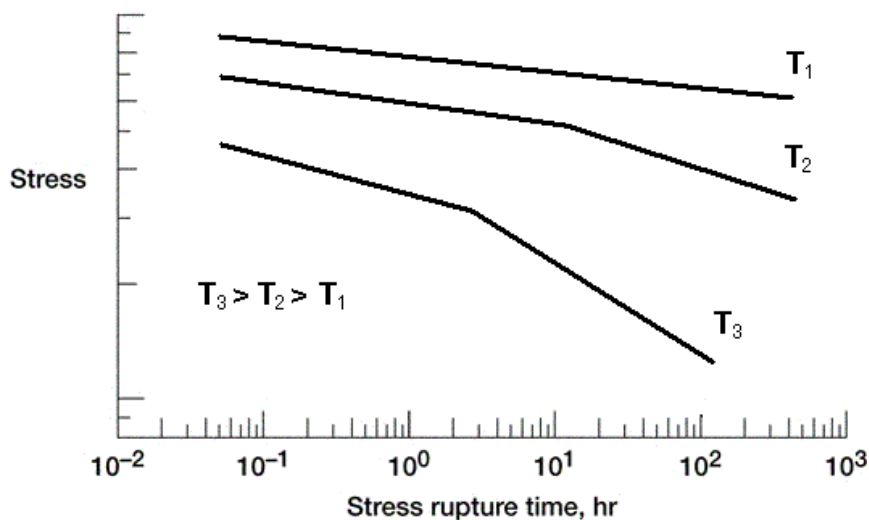
Figure 1.5-10. Yield strength and creep rupture strength at constant time as a function of temperature.

Ett högre utbyte av en anläggning är relaterat till en högre drifttemperatur. För konventionella kraftanläggningar innebär ett tillfredställande utbyte att de använda materialen dimensioneras för en tillåten krypning. Detta innebär i sin tur att de kryptåkända komponenterna har en ändlig livslängd. Traditionellt är den dimensionerande livslängden 100 000 timmar, det vill säga ca 11 års drifttid. På 1980-talet började man dimensionera mot livslängden 200 000 timmar. Nu är 200 000 timmar det allra vanligaste designkriteriet vid krypdimensionering av t.ex. överhettare och

ångledningar. Anledningen till att man kan dimensionera för en längre kryplivslängd än tidigare är att det finns nu tillräckligt med krypdata för detta för flesta material som används. Som kriterium vid dimensioneringen används vanligen tiden till brott men om till exempel formavvikelse har betydelse för komponentens funktion kan kriteriet utgöras av en maximal tillåten kryptöjning.

En säkerhetsfaktor tillämpas vid dimensionering. Den tillåtna spänningen är en reduktion av brottspänningen med en faktor 1,5 och 1,25 då den dimensionerade livslängden är 100 000 respektive 200 000 timmar. Det betyder att den faktiska livslängden är ungefär lika lång för de båda fallen. För närvarande pågår en översyn av dessa dimensioneringsregler eftersom de nuvarande säkerhetsfaktorerna för olika livslängder har blivit starkt ifrågasatta.

Med kryplivslängd avses vanligtvis tiden till krypbrott för en given spänning. Med kryphållfasthet avses analogt den spänning som medför krypbrott för en given brottid, t.ex. 100 000 timmar. För vissa typer av komponenter, t.ex. roterande, är livslängden slut redan efter små deformationer i och med att olika delar då skulle ta i varandra. I sådana fall används tid till en given töjning, 1 % är vanligast, som dimensioneringskriterium istället för tid till krypbrott. I Figur 1.5–11 visas schematiskt tid till krypbrott,  $t_f$ , som funktion av spänning vid tre olika temperaturer. Av figuren framgår det att vid relativt hög temperatur och längre brottider (dvs. lägre spänningar) ändras det linjära sambandet mellan spänning och tid i ett log-log diagram. Det beror på förändrade deformationsmekanismer.



Figur 1.5–11 Brottid som funktion av spänning vid krypprovning av ett material vid tre olika temperaturer.

Figure 1.5–11 Stress vs. time to rupture for creep testing of a material at three different temperatures.

Jämför man kryphållfastheten hos ett varmhållfast stål vid en spänning som tillsammans med en säkerhetsfaktor på 1,5 ger 100 000 timmars livslängd med för samma spänning utan säkerhetsfaktor ökar livslängden med en faktor 4. Den egentliga livslängden skulle alltså kunna vara 400 000 timmar om den dimensionerade är 100 000 timmar. I verkligheten spelar dock många faktorer roll som ger upphov till att livslängden i materialet förbrukas och skador uppstår på betydligt kortare tider än förväntat. Några viktiga faktorer är att:

- i) Bestämning av ett materials krypegenskaper utförs traditionellt med enaxlig provning medan fleraxliga spänningstillstånd råder i de kryppåkända komponenterna. Fleraxlighet ger i många fall höga spänningskoncentrationer under komplexa former.
- ii) Dataunderlag för dimensionering kan ha osäkerhet i form av stor spridning i provresultat och i många fall används extrapolation mot längre tider än vad som provats.
- iii) Svetsar uppvisar komplexa krypbeteenden som typiskt resulterar i reducerad kryphållfasthet.
- iv) I ångsystem är systemspänningar vanligt förekommande. Utöver spänningar orsakade av inre övertryck kan då överlagrade böj- eller dragspänningar verka vid positioner som formstycken, påstick och terminalpunkter i systemet. Sådana positioner har i regel grövre godstjocklek för att kompensera mot eventuella systemspänningar men det är ändå där som krypskador och krysprickor är vanligast.

Det finns fler exempel och problemet kan sammanfattas med att effekterna av förutsedda och oförutsedda påkänningar i kombination med materialegenskaper och materialförändringar i drift har visat sig kunna bli större än den kompensation som säkerhetsfaktorn ger. Figur 1.5–12 visar ett T-stycke i en huvudångledning där krysprickor påträffats i en svets vid en kontroll efter ca 90 000 timmars drifttid.



**Figur 1.5–12. Krysprickor i ett T-stycke i ett svenskt kraftvärmeverk.**

**Figure 1.5–12. Creep cracks in a T-joint in a Swedish power plant.**

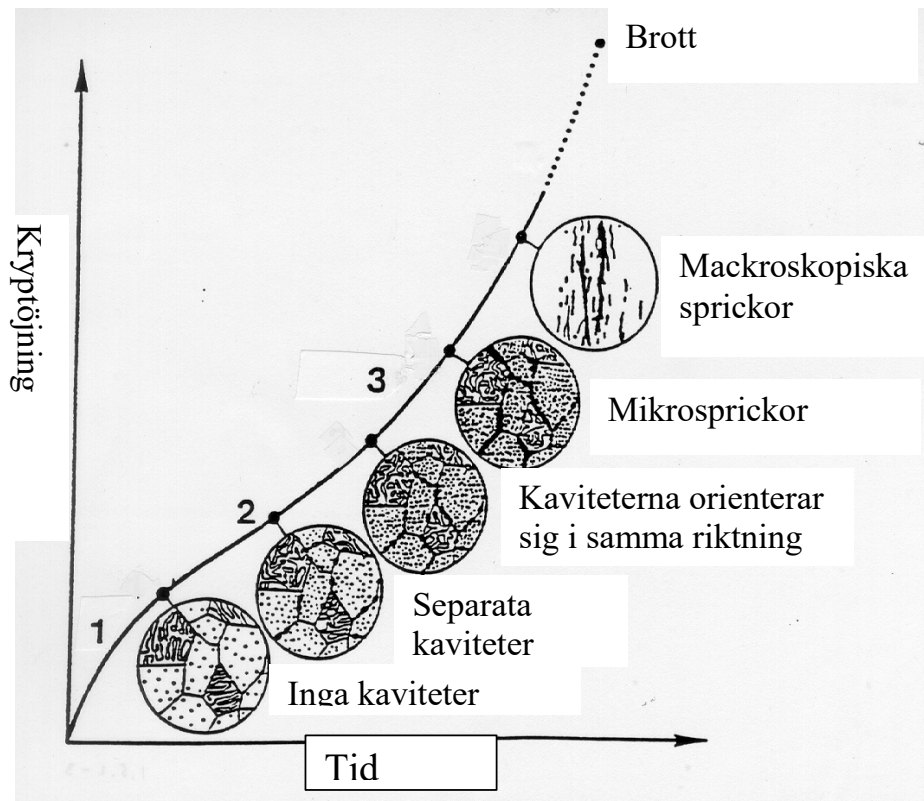
Det finns en rad mekanismer inblandade vid krypning och krypskadebildning. Det grundläggande beteendet kan beskrivas med en hjälp av en kryptöjningskurva. Figur 1.5–13 visar schematiskt kryptöjning som funktion av tid vid konstant temperatur och spänning. Tre stadier kan identifieras på kurvan:

- i) Primär krypning med avtagande kryphastighet. Hårdnande mekanismer liknande deformationshårdning svarar för den avtagande kryphastigheten.



- ii) Sekundär krypning med en konstant kryphastighet. Termiskt aktiverade processer utvecklas med tiden som ger en mjuknande effekt **och underlättar krypdeformation**. Dessa hålls i jämvikt av hårdnandet.
- iii) Tertiär krypning med en accelererande kryphastighet. Mjuknandet tar överhanden vilket slutligen leder till brott.

Brottöjningen och proportionerna på kryptöjningskurvan kan variera stort. Beroende på material, materialtillstånd, spänning, spänningstillstånd, och temperatur kan töjningen vid brott, krypduktiliteten, variera i storleksordningar mellan 1 till 100 %. Detta visar på det faktum att det finns många olika deformationsmekanismer som styr krypningen. Vilka mekanismer som kan vara avgörande för kryplivslängden är ofta individuellt för varje materiallegering. Värmebehandlingen innan materialet tas i bruk har stor betydelse för effekten av olika mekanismer. Dessutom har spänning och temperatur stor inverkan på effekten av en mekanism.



Figur 1.5–13. Kryptöjning som funktion av tid med den för låglegerade varmhållfasta stål typiska utvecklingen av kryptkaviteter i mikrostrukturen till krypsprickor markerade på kurvan.

Figure 1.5–13. Creep strain versus time with the typical development of creep cavities to creep cracks for low alloy heat resistant steels marked at the curve.

Det är mikrostrukturen i materialet som genomgår degenererande ändringar i krypprocessen. I huvudsak är det termiskt aktiverade förändringar av:

- i) Struktur, sammansättning och storlek av utskiljningar i mikrostrukturen.

- ii) Struktur och täthet av avvikelser i atomuppbyggnaden, så kallade dislokationer. Det är via dislokationsrörelser som deformationer fortplantar sig i metalliska material.

Förändringarna påverkas dessutom av spänningen och den pågående deformationen.

Utöver dessa mekanismer bildas krypkaviteter i mikrostrukturens korngränser. Även här finns olika mekanismer som styr kärnbildning och tillväxt beroende på spänning och temperatur. Större utskiljningar och inneslutningar initierar kavitetsbildning. Annan inverkan av utskiljnings- och dislokationsstrukturer på kavitetsbildningen kan föreligga men förståelsen för sådana effekter är begränsad (Penny 1995).

Vid de temperaturer och spänningar som råder i kryppåkända komponenter i anläggningarna utvecklas kaviteter ofta på följande sätt: Enstaka kaviteter bildas och ökar med tiden i antal och storlek. Med ökande antal uppträder kaviteterna som stråk i korngränserna där de orienterar sig efter spänningsriktningen. Kavitetsstråken växer sedan ihop till mikrosprickor vilka i sin tur länkas till makrosprickor. Kavitetsutvecklingen kan relateras till livslängden. De tidpunkter då de olika **graderna av krypskada** typiskt uppträder för låglegerade stål har illustrerats på kryptöjningskurvan i Figur 1.5–13. I anläggningar är replikprovning av mikrostrukturen vanligt förekommande i syfte att bedöma en kryppåkänd komponents tillstånd och återstående livslängd, se **avsnitt 1.6.6**.

De material som används i kryppåkända komponenter varierar med kraven. I kapitlen om mekaniska komponenter beskrivs varmhållfasta material som tillämpas på olika aktuella komponenter närmare.

#### REFERENSER

- Boyle J.T. & Spence. 1983. J., Stress analysis for creep. Butterworth & Co. Ltd.
- Penny R. K. & Mariott D. L. 1995. Design for creep, Chapman & Hall.



### 1.5.3 Korrosion

Korrosion är en kemisk reaktion mellan ett material och den omgivande miljön med sådan följd att materialet påverkas. Drivkraften för korrosion kan förenklat sägas vara materialets strävan att återgå till sin naturliga form. Metaller förädlas ur sin ursprungliga form, malm och mineraler, i hyttor och smältverk under kraftig tillförsel av energi. Det nya rena metalliska tillståndet är i praktiken inte lika stabilt. Det finns därför en drivkraft hos de flesta metallerna att omvandla sig till sina ursprungliga mer stabila former. När en metall korroderar är det alltså en slags återgång till malmstadiet som sker.

När man talar om korrosion avser man vanligen metaller, men korrosion sker även på andra material så som plast, betong och glas. Följande avsnitt behandlar dock endast korrosion på metalliska material. Rostning av järn och stål är kanske den mest kända korrosionsformen eftersom dessa två material tillhör våra vanligaste konstruktionsmaterial. Samhällets kostnad för korrosion är enorm: ca 4 % av bruttonationalprodukten är en siffra som brukar nämnas. Förmodligen står just järnets rostning för en relativt stor del av detta.

Korrosionsläran indelas vanligen i två delar: *elektrokemisk korrosion* och *kemisk korrosion*. Övervägande delen av den korrosion som sker är av elektrokemisk natur. Korrosionen sker här genom elektrodreaktioner och hit räknas all korrosion som sker i närvaro av fukt. Allmänkorrosion, gropfrätning och galvanisk korrosion är några exempel på olika korrosionsformer som orsakats av elektrokemiska reaktioner. Kemisk korrosion sker under inverkan av torra gaser eller helt vattenfria organiska vätskor (Mattsson 1987). Högttemperaturkorrosion räknas till denna del av korrosionsläran.

#### 1.5.3.1 Elektrokemisk korrosion

Tyngdpunkten kommer i följande avsnitt att ligga på de elektrokemiska korrosionsformerna, och därför inleds detta avsnitt med en kort genomgång av de viktigaste elektrokemiska grundbegreppen. Därefter följer en genomgång av några av de viktigaste korrosionsformerna.

##### 1.5.3.1.1 Oxidation och reduktion

En *elektrokemisk reaktion* kännetecknas av avgivandet eller upptagandet av elektroner. En reaktion där elektroner avges kallas en *oxidation*, medan en reaktion där elektroner upptas kallas en *reduktion*. Eftersom elektroner i regel inte kan existera fria i nämnvärd koncentration kommer dessa två processer alltid att ske under varandras inverkan: de elektroner som frigörs vid oxidationen tas snart om hand av reduktionsreaktionen.

Exempel på en oxidation är järn som går i lösning under bildandet av järnjoner:



Exempel på en reduktion är hydrolys av vatten och syrgas:



##### 1.5.3.1.2 Elektrokemiska celler

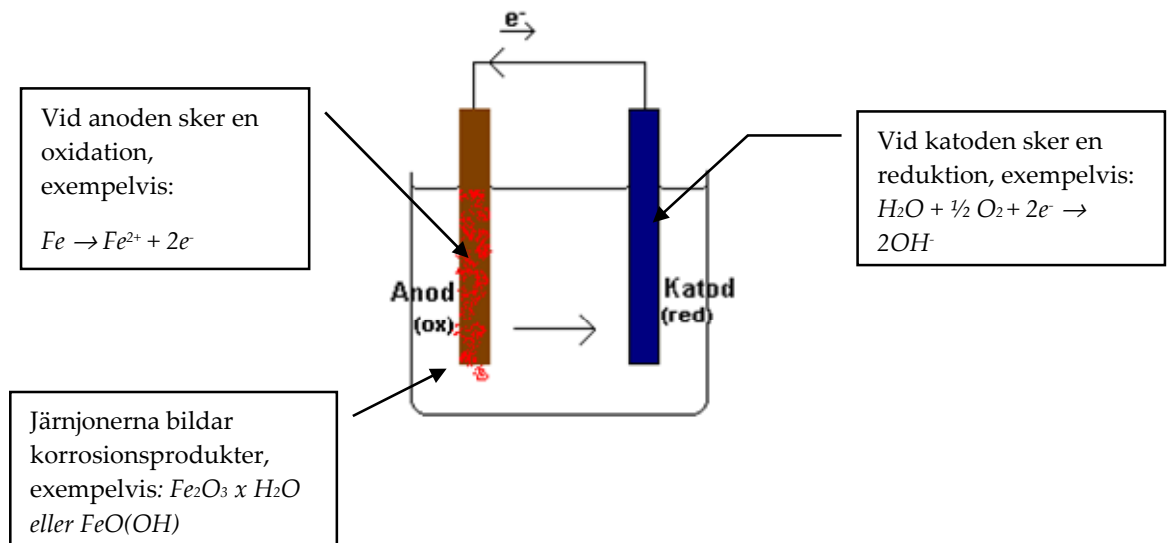
Oxidationen och reduktionen kan antingen ske ute i en lösning eller vid ytorna på metalliska ledare. Vid den ena ledaren, *anoden*, sker en oxidation, och vid den andra ledaren, *katoden*, sker en reduktion. Elektrokemiskt aktiva ledare kallas *elektroder*.

Mellan elektroderna transporteras elektronerna från anoden, där de frigörs, till katoden, där de konsumeras.

För att korrosionsprocessen skall kunna fortgå behövs dessutom en vätskelösning, en *elektrolyt*, i vilken joner som deltar i anod- respektive katodprocessen transporteras. Ett system av anod, katod, elektrisk ledare däremellan och elektrolyt kallas för en *elektrokemisk cell*.

Det finns två typer av elektrokemiska celler: en där den elektrokemiska processen sker spontant och en där den sker till följd av en yttre pålagd spänning. Den förra cellen kallas *galvanisk* och den senare *elektrolytisk*.

Korrosion är i allra högsta grad ett spontant förlopp och därför kan vi i fortsättningen använda begreppet galvanisk cell när vi talar om elektrokemiska korrosionsceller. Anoden och katoden i en galvanisk cell kan vara två delar av samma metall, eller två olika metaller som förbundits genom en elektrisk ledare, se exemplet i Figur 1.5–13. I båda fallen flyter en ström från katoden "pluspolen" till anoden "minuspolen", där själva metallösningen sker. Det som driver strömmen är den elektriska potentialspänningen mellan de två elektroderna, som då cellen inte avger någon ström kallas *elektromotorisk*.



Figur 1.5–13. Galvanisk cell.

Figure 1.5–13. Galvanic cell.

Det som avgör om en metall kommer att ha låg eller hög potential, dvs. bli anod eller katod i en galvanisk cell är dess benägenhet att reagera med elektrolyten. En metall som inte är speciellt benägen att reagera med sin omgivning sägs vara en *ädel* metall, medan de metaller som lätt reagerar med omgivningen sägs vara *oädla*. Oädla metaller kommer snabbt att gå i lösning och medföra att elektroner frigörs och därmed bli mer negativt laddad än, en ädel metall. Guld och platina är exempel på metaller som är ädla i ett stort antal miljöer, medan kalium och magnesium är exempel på oädla metaller. Vissa metaller kan vara oädla i en miljö och ädla i en annan och alltså bli anod eller katod i en galvanisk cell beroende på elektrolyt eller temperatur.

I naturen uppstår ofta anod och katod på en och samma metall. Den elektriska ledaren är i detta fall metallen själv. Förutsättningen för att en galvanisk cell ska kunna bildas är att en elektrolyt, till exempel en vätskefilm, förbinder de två ytorna. Att en yta på metallen fått oädlare egenskaper än den andra kan antingen bero på metallen själv eller på elektrolyten. En repa i ytskiktet, en segring, materialdefekt eller en lokalt värmepåverkad zon intill en svets kan vara tillräckligt för att skapa en lokal anod. Skillnader i den yttre miljön, så som att syrehalten varierar över ytan på ett och samma objekt, är ett annat exempel på ett fenomen som ger upphov till lokala potentialskillnader. Den syrerika delen kommer att bli katod, eftersom syre deltar i katodprocessen (jfr Figur 1.5–13). I de fall då koncentrationsvariationer ger upphov till potentialskillnad talar man om *koncentrationsceller*, och i fallet syre, *syreceller*. Bildning av koncentrationsceller, och då främst syreceller, är ett fenomen som har stor teknisk betydelse eftersom de är verksamma såväl vid avlagringskorrosion såväl som korrosion i stillastående vätskor, s.k. *stilleståndskorrosion*.

Exempel på en elektrolytisk cell är cellen vid elektrolytisk metallbeläggning, t.ex. elektrolytförzinkning eller förkromning. Föremålet för metallbeläggningen kopplas som minuspol till en yttre spänningskälla, i en cell med en elektrolyt som innehåller beläggningmetallens joner. Den yttre spänningskällan förser föremålet med elektroner, så att de positiva jonerna i lösningen reduceras till metall och faller ut på denna. Eftersom det är en reduktion som sker vid föremålets yta blir föremålet katod. Ett exempel på en elektrokemisk cell som både kan fungera galvaniskt och elektrolytiskt är blyackumulatören: vid urladdning är den en galvanisk cell och vid uppladdning en elektrolytisk.

#### 1.5.3.1.3 Passivitet

Vissa metaller som vi associerar med goda korrosionsegenskaper är rent teoretiskt förvånansvärt oädla och har fenomenet *passivering* att tacka sitt goda rykte för. Det mest kända exemplet på en s.k. *passiverbar metall* är rostfritt stål, men också aluminium, titan och i viss mån kolstål hör till denna grupp.

Passivering innebär att ett skyddande skikt bildas på metallens yta. I fallet rostfritt stål är det kromoxid,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , som bildas och i fallen aluminium och titan är det aluminiumoxid,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , respektive titanoxid,  $\text{TiO}_2$ , som bildas. På kolstål bildas under syrefria och/eller alkaliska miljöer, dvs. miljöer med högt pH, ett passivskikt av magnetit,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ . Gemensamt för dessa *passivskikt* är att de bildas redan i mildt oxiderande atmosfär, som luft, och materialen är betydligt ädlare i sitt s.k. *passiva tillstånd* än i sitt *aktiva tillstånd*, d.v.s. då passivskiktet saknas. En defekt eller repa i passivskiktet innebär ofta korrosionsrisk, se vidare i **avsnitt 1.5.3.2.3 Gropfrätning**.

#### 1.5.3.2 Olika korrosionsformer

Även om drivkraften för korrosion är gemensam för de flesta material och miljöer tar sig själva korrosionsangreppet många olika uttryck. I följande avsnitt beskrivs översiktligt de vanligaste korrosionsformerna som bedöms vara av intresse för den kraftproducerande industrin.

De flesta korrosionsformerna har det gemensamt att korrosionen sker genom en *anodisk upplösning av metallen*. Detta gäller inte de väterelaterade skadorna, som därför ofta utanför korrosionsområdet. Eftersom väterelaterade skador är ett viktigt skadefenomen, tas de ändå upp i detta avsnitt.

#### 1.5.3.2.1 Allmän korrosion

Allmän korrosion, eller jämn korrosion, medför som namnet antyder ett allmänt angrepp med ungefär samma hastighet över materialet. Angreppets omfattning uttrycks ofta genom viktsförlust per ytenhet, eller som en hastighet i till exempel mm/år. Det är främst icke passiverbara metaller eller passiverbara metaller som befinner sig i sitt aktiva tillstånd, som angrips av allmätkorrosion.

Korrosionshastigheten används ofta för att avgöra om den passiverbara metallen befinner sig i sitt passiva eller aktiva tillstånd: om korrosionshastigheten understiger 0,1 mm/år, anses till exempel rostfritt stål vara passiverat.

Allmätkorrosion är en elektrokemisk korrosionsform, varför både anoder och katoder återfinns på det korroderade materialets yta. Att angreppet blir så jämt utspritt förklaras av att anod- och katodytorna ligger så tätt att de inte går att särskilja och/eller att de regelbundet byter plats.

Allmätkorrosion ger ofta upphov till rikligt med korrosionsprodukter. Ibland har dessa korrosionsskyddande egenskaper och materialet erhåller en viss passivering. Tyvärr är detta långt ifrån alltid fallet, eftersom miljön under korrosionsprodukterna i stället ofta blir mer korrosiv. Accelererade korrosionsangrepp under korrosionsprodukter är ett fenomen som är nära besläktat med avlagringskorrosion, som diskuteras i **avsnitt 1.5.3.2.2**.

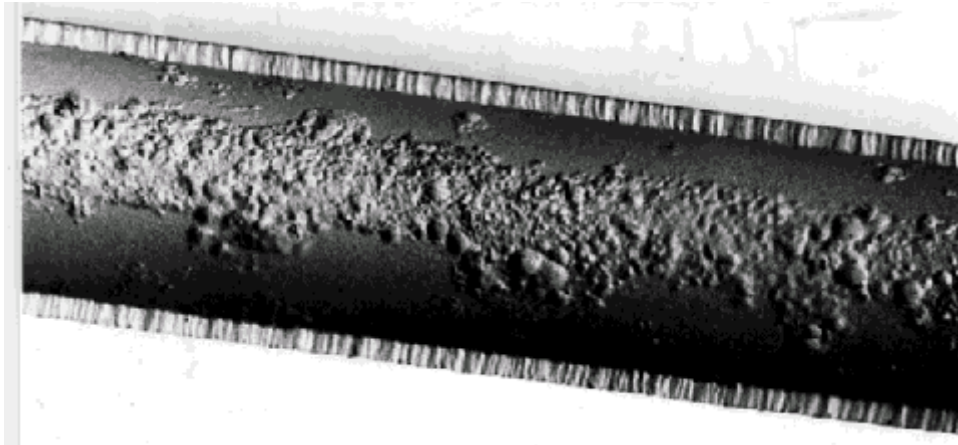
##### 1.5.3.2.1.1 Daggpunktskorrosion

Ett vanligt exempel på allmätkorrosion är den jämna avfrätning kolstål och rostfritt stål utsätts för i svavelsyra. Just det här fenomenet har i rökassammanhang en speciell benämning, nämligen *daggpunktskorrosion* eller *lågtemperaturkorrosion*. Svavelsyra och svavelsyrighet kondenserar ut ur svavelhaltiga rökgaserna om dessa kyls till temperaturer under syrans daggpunkt. Syrornas daggpunkter beror av gasens sammansättning, tryck och temperatur, men ligger för svavelsyrans del runt ca 150 °C. Vatten och saltsyra har betydligt lägre daggpunkter varför dessa inte kommer att kondensera ut förrän vid ytterligare kylning av rökgasen.

##### 1.5.3.2.2 Avlagringskorrosion

Avlagringskorrosion uppkommer som namnet antyder under olika typer av avlagringar. Ett exempel visas i Figur 1.5–14. Beläggningarna behöver nödvändigtvis inte vara korrosiva i sig själva, eftersom korrosionsprocessen kan initieras endast på grund av den fukt som hålls kvar inne i beläggningen. Miljön under avlagringen blir i regel syrefattig, medan tillgången på syre utanför avlagringen kan vara obegränsad. Skillnaden i syretillgång skapar en syrecell och en lokal anod bildas under avlagringen, medan den omgivande ytan utgör katod.

Avlagringskorrosionen accelereras ofta av att kloridjoner, Cl<sup>-</sup>, koncentreras i avlagringen och vid metallytan. Effekten av kloridjoner och varför dessa ansamlas vid korroderande ytor diskuteras i **avsnittet om gropfrätning 1.5.3.2.3**.



Figur 1.5–14. Avlagringskorrosion på fjärrvärmesidan av en värmekondensortub (efter blästring) [ALSTOM Power].

Figure 1.5–14. A tube half with an inner deposition [ALSTOM Power].

För att detektera avlagringskorrosion krävs noggrann rengöring av metallen. Angreppet är nämligen till ytan begränsat av beläggningens storlek och tillväxer på djupet, se exemplet i Figur 1.5–15. Utseendet hos korrosionsangreppen efter rengöring av ytan från avlagringar och korrosionsprodukter påminner om gropfrätning, som dock initieras av en annan korrosionsmekanism. Tillväxten, eller *propageringen*, av avlagringskorrosion och gropfrätning har dock mycket gemensamt.



Figur 1.5–15. Ett exempel på avlagringskorrosion. Bakom en svets har en avlagring bildats med en koncentrationscell och korrosion som följd. Bilden visar korrosionsskadan sedan avlagringen avlägsnats [ÅF-IPK AB].

Figure 1.5–15. An example of deposition corrosion is shown. Next to the weld a deposition have arise resulting in a concentration cell and corrosion. The figure shows the corrosion damage after removal of the deposit [ÅF-IPK AB].

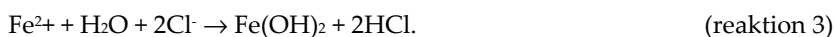
Avlagringskorrosion är en korrosionsform som drabbar industrin så väl som privatpersoner. Ansamling av löv i hängrännor, påväxt av havsorganismer på båtskrov och vägsmutts som kastas upp under bilen av hjulen är några vardagliga exempel.

#### 1.5.3.2.3 Gropfrätning

Gropfrätning eller punktfrätning är ett lokalt korrosionsangrepp som ger upphov till frätgropar i metallytan. Pitting Corrosion är den engelska benämningen och begreppet "pitting" används ibland även hos oss. Till skillnad från vid allmänkorrosion har man här helt separerade anod- och katodytor: materialet inne i gropen är anod och den omgivande ytan är katod. Gropfrätning drabbar i regel de passiverbara metallerna till följd av ett brott i den skyddande passivfilmen.

Mekanismen för gropfrätning brukar indelas i tre skeden: *initiering*, *propagering* och *repassivering*. Initieringen av en frätgrop sker i regel efter en viss inkubationstid. Efter en tids tillväxt kan korrosionen avstanna till följd av repassivering. Detta gör det i stort sett omöjligt att förutsäga hastigheten för korrosionsangreppet på det sätt man begagnade sig av i fallet allmänkorrosion.

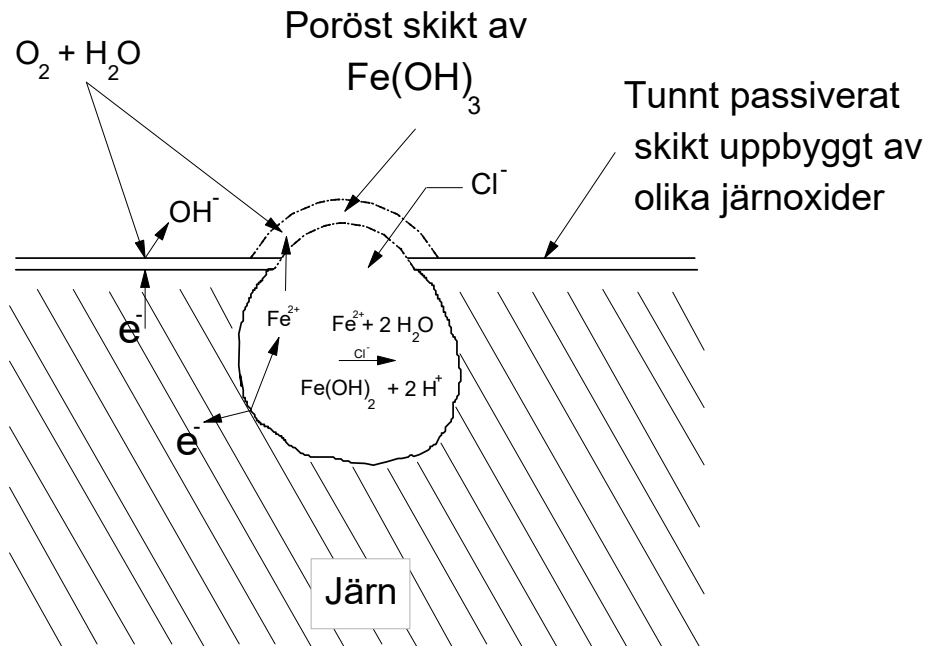
Till initieringssteget finns ett antal föreslagna mekanismer: lokala koncentrationsceller, kloridansamlingar eller defekter i passivskiktet är några exempel på hur en lokal anod bildas. När väl korrosionsprocessen kommer i gång kommer miljön i närheten av anodytan att bli mer korrosiv, varför angreppet lätt accelereras. Anledningen till den mer korrosiva miljön är att de metalljoner som bildas vid anodprocessen, exempelvis järnjoner (jfr reaktion 1), attraherar negativa joner från lösningen. Kloridjoner, som är ett exempel på en vanligt förekommande jon som dessutom lätt transporteras genom eventuella korrosionsprodukter, bidrar till hydrolys av vattnet i närheten av anodytan enligt reaktion 3. Resultatet blir en lokal pH-sänkning inne i gropen med ökad frigörelse av positiva metalljoner, tillströmning av kloridjoner, ytterligare hydrolys av vatten och fortsatt pH-sänkning som följd.



Saltsyran, HCl, som bildas ökar lösligheten av järnjoner och hindrar effektivt en nybildning av ett eventuellt passivskikt. Korrosionsprodukter i form av järnhydroxiden,  $\text{Fe}(\text{OH})_2$ , påträffas ofta inne i frätgropen.

De tvåvärda järnjonerna,  $\text{Fe}^{2+}$ , oxideras till trevärda järnjonerna,  $\text{Fe}^{3+}$ , och bildar under inverkan vätejoner,  $\text{H}^+$ , vatten och syre en krusta av järnhydroxid,  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ , ovanpå frätgropen. Den här *krustan* av rost förhindrar dock inte i regel fortsatt korrosion eftersom den är porös och fortsätter att släppa igenom kloridjoner. En schematisk frätgrop visas i Figur 1.5–16.

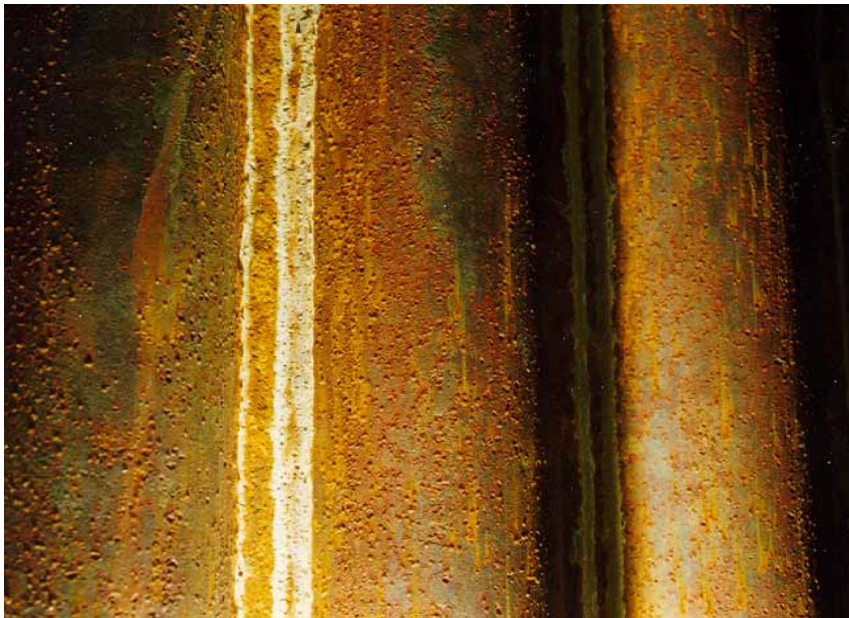




Figur 1.5–16. En schematisk bild över några av de reaktioner som sker i en frätgrop i en järnlegering.

Figure 1.5–16. A schematic sketch over some of the reactions in the development of pitting corrosion in a iron base alloy.

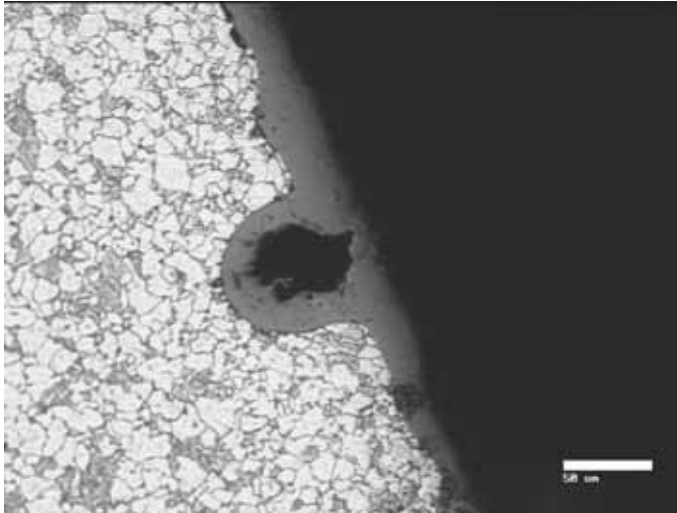
Figur 1.5–17 visar exempel på angrepp av gropfrätning på en pannvägg.



Figur 1.5–17. En pannvägg med många små gropfrätor på ytan. En del av groparna är fortfarande täckta av krustor av korrosionsprodukter [ÅF-IPK AB].

Figure 1.5–17. Water wall tubes with many small pittings on the surface. Some of the pits are still covered with corrosion products. [ÅF-IPK AB].

Under vissa omständigheter kan förhållandena i frätgropen ändras så att det i botten på gropen på nytt bildas ett passiverande skikt. Frätgropen har då repassiverats och korrosionsprocessen har avstannat. I Figur 1.5–18 visas hur en frätgrop i en panntub repassiverats genom att ett skyddande magnetitskikt bildats i och utanför gropen.



Figur 1.5–18. En repassiverad frätgrop på vattensidan hos en överhettartub [DNV AB].

Figure 1.5–18. Repassivated pit at the water side of a superheater tube [DNV AB].

En variant av gropfrätning som tyvärr ofta gör sig påmind på vattensidan av tuberna i en förbränningspanna är s.k. *stilleståndskorrosion*. Magnetitskiktet som byggts upp under drift, bryts ner när vatten blir stående i rören samtidigt som syretillgången blir god vid en avställning. Resultatet blir mycket distinkta frätgropar i magnetitskiktet, se Figur 1.5–19.



Figur 1.5-19. Gropfrätning till följd av medbrytning av magnetitskikt [DNV AB].

Figure 1.5-19. Pitting corrosion due to break-down of magnetite film [DNV AB].



#### 1.5.3.2.4 Galvanisk korrosion

Drivkraften bakom galvanisk korrosion – skillnaden i potential mellan två områden – har redan diskuterats i **avsnittet 1.5.3.1.2.1**. I de fall där den galvaniska cellen består av två olika material orsakas potentialskillnaden av att de olika materialen är olika ädla. Galvaniska celler kan dock även uppstå på ett och samma material. I den termogalvaniska cellen är det temperaturskillnaden som påverkar de kemiska reaktionerna på ytan med den effekten att ett område blir anod och ett blir katod. Ett annat exempel på hur en galvanisk cell bildas är när koncentrationsceller, som till exempel syreceller, se **avsnitt 1.5.3.1.2.1**, bildas.

Hur ädelt ett material är i en viss miljö kan uppskattas med s.k. galvaniska spänningsserier, i vilka olika materials potentialer relativt en känd inert referenselektrod anges. Med tillgång till den här informationen kan alltså konstruktören förutsäga vilket av de material som står i elektrisk förbindelse med varandra i en konstruktion, som riskerar att korrodera på grund av galvaniska effekter. Vid konstruktionsarbete är det vidare viktigt att beakta storleken på anod- respektive katodytan. I de fall katodreaktionen är den som begränsar den galvaniska korrosionen, vilket till exempel är vanligt när katodreaktionen är beroende av syre som måste hinna diffundera fram till katodytan, kommer materialavverkningen på anoden att öka med ökat storleksförhållande katodyta/anodyta. Vid konstruktion mot galvanisk korrosion är det viktigt att hålla i minnet att det endast är de ytor som förutom elektrisk kontakt även står i vätskeförbindelse med varandra som ingår i den galvaniska cellen. Exempel på galvanisk korrosion visas i Figur 1.5–20.



Figur 1.5–20. Exempel på galvanisk korrosion mellan kolstål (anod) och rostfritt stål (katod) [DNV AB].

Figure 1.5–20. Example of galvanic corrosion between carbon steel (anode) and stainless steel (cathode) [DNV AB].

#### 1.5.3.2.5 Spaltkorrosion

Den här korrosionsformen är närbesläktad med fenomenet gropfrätning: det är en korrosionsform som ger upphov till ett lokalt angrepp och genererar själv en korrosiv miljö i anslutning till angreppet. Ytan inne i spalten blir anod och ytan utanför blir katod. Spaltkorrosion kan förekomma på de flesta metaller, men risken bör speciellt beaktas för de passiverbara metallerna.

Spaltkorrosion kan dels bero på att vätska hålls kvar inne i en trång spalt när övriga ytor torkar. Olika stålkonstruktioner i utomhusatmosfär är exempel på detta. Spaltkorrosion kan också initieras i trånga spalter där både spalt och omgivande ytor befinner sig i vätska. Initieringen av korrosionen i spalten kan orsakas av uppkomsten av en syrecell eftersom tillgången på syre inne i spalten är begränsad. När väl korrosionen kommer i gång, sker en pH-sänkning på samma sätt som vid fallet gropfrätning.

Tillväxten av spaltkorrosionen sker ofta en liten bit in i spalten vilket gör det svårt att upptäcka korrosionsskadan. Spaltkorrosion avslöjas dock ofta med att det läcker ut korrosionsprodukter i spaltens mynning. Korrosionsprodukterna är väldigt porösa och har betydligt större volym än den bortkorroderade metallen. Ibland kan man se hur korrosionsprodukterna sprängt isär och öppnat spalten.

#### 1.5.3.2.6 Nötningskorrosion

Nötningsoxidation är en typ av **erosionskorrosion (avsnitt 1.5.5)** som uppkommer i beröringsytan mellan två metaller som rör sig relativt varandra. Då metallytor nöter mot varandra under tryck sker avverkning av ytoxid. Ytoxiden återbildas, vilket resulterar i materialåtgång.

#### 1.5.3.2.7 Mikrobiell korrosion

Mikrobiologisk korrosion förekommer främst i system med neutralt pH (5-9) och i stationärt vatten av temperatur under 40°C (Mattsson 1987). Mikrobiologisk korrosion är ofta något som kommer som en överraskning, eftersom man inte direkt väntar sig någon större avverkning vid så låga temperaturer och i för övrigt korrosivt milda miljöer.

Det finns många grupper av bakterier som är verksamma i olika miljöer. Vanligen delas bakteriestammarna in i grupper som beskriver vad de åstadkommer. Bakterier som till exempel reducerar sulfationer,  $\text{SO}_4^{2-}$ , till sulfid,  $\text{S}^{2-}$ , kallas *sulfatreducerande bakterier*, förkortat SRB. Dessa bakterier är anaeroba, dvs. de lever i syrefri atmosfär, och är förmodligen de mest korrosiva av de kända bakterierna (Jones 1992). De producerar svavelväte och åstadkommer koncentrationsceller. I fallet järn bildas krutor av korrosionsprodukter av järnsulfid,  $\text{FeS}$ , över korrosionsangreppet. Korrosionsprodukterna accelererar sedan angreppet på det sätt som diskuterats i **avsnittet om avlagringskorrosion, 1.5.3.2.2**.

Järnoxiderande bakterier är exempel på aeroba bakterier, som alltså förutsätter syre för sin överlevnad. Järnoxiderande bakterier bildar speciella korrosionsprodukter, så kallade tuberkler, som kan tillväxa till groteska storlekar och ibland sätta igen en hel rörledning.

Motåtgärden mot mikrobiell korrosion är ofta tillsats av olika typer av biocider. Behandlingen är svår eftersom giftet inte alltid lyckas tränga igenom de kraftiga

korrosionsprodukterna som bildas ovanför angreppen. Det sätt som är att föredra, för att förhindra angrepp, är att ordentligt rengöra materialet och sedan se till att undvika kvarvarande fukt och stillastående vatten.

#### 1.5.3.2.8 Högtemperaturkorrosion

Högtemperaturkorrosion brukar definieras som en direkt reaktion mellan oxiderande gaser och en metall vid höga temperaturer. Hastigheten på reaktionen ökar generellt med ökande temperatur.

De korrosionsprodukter som bildas vid reaktionen kan vara täta, hårt sittande och utgöra ett passivskikt, men de kan också vara porösa och lätt flagna av. I det första fallet är korrosionshastigheten begränsad av diffusionen genom passivskiktet och korrosionshastigheten minskar därför med skiktets tillväxt. Även om tillväxten av passivskiktet är långsam, kommer det tids nog att brytas upp på grund av inre spänningar. Tjockleksmätning av skikt är därför en bra kontroll på dess status. Skiktet, som inte är att betrakta som en metall utan i stället ett keramiskt material, är i regel sprött och kan förstöras antingen på mekanisk väg genom till exempel erosion eller sprickbildning, eller på kemisk väg genom till exempel reaktion med en saltsmälta. När skiktet lokalt bryts upp bildas transportvägar för korrosiv gas in till metallytan och reaktionen kan fortsätta.

Vilken typ av skikt som bildas beror på kombinationen av material och omgivande miljö.

De vanligast förekommande formerna av högtemperaturkorrosion i kraftpannor är oxidation och saltsmältakorrosion.

#### *Oxidation*

I ren luft och i oxiderande atmosfär är högtemperaturlegeringar användbara under en viss kritisk temperatur, den s.k. *skalningstemperaturen*. Under denna temperatur bildas ett långsamt tillväxande stabilt och tätt passivskikt som skyddar metallen. Skiktets tillväxthastighet ökar med temperaturen. Vid skalningstemperaturen börjar en ny oxidfas bildas som inte är stabil i lägre temperaturer. I kolstål är det Wüstit ( $\text{FeO}$ ) som bildas och växer till. Tillväxthastigheten kan karaktäriseras som linjär till skillnad från de oxidfaser som dominerar vid lägre temperaturer: Magnetit och Hematit,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  respektive  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , vars tillväxthastighet är logaritmisk. Relativt snabbt bildas skikt av Wüstit närmast metallen som är så tjocka att de spricker och oxiden skalar på så sätt av. Wüstiten i sig är dessutom mer porös än magnetit och utgör i sig också ett sämre korrosionsskydd.

För rostfritt stål, typ SS-stål 2333 med ca 8 % Ni och 18 % Cr är skalningstemperaturen ca 850°C medan den endast är ca 570° för ett kolstål. Effekten är i stort sett linjär och vid 27 % krom har skalningstemperaturen höjts till ca 1125°C (Avesta Sheffield 1999). Genom att legera stålet med krom höjs alltså skalningstemperaturen väsentligt. Ibland kan även materialet inne i metallen oxideras. Inre oxidation med oxidbildning i korngränserna som följd försvagar materialet och försvårar bildningen av ett skyddande oxidskikt.

Molybden är ett ämne som är känt för att minska risken för gropfrätning, se vidare [avsnitt 1.5.3.2.3](#) samt öka varmhållfastheten. Effekten av molybden i högtemperatursammanhang är dock inte enbart positiv eftersom detta ämne, som lätt

reagerar med syre, kan leda till s.k. *katastrofal oxidation*, med sprickor och flagning som följd.

Miljöer som inte är tillräckligt oxiderande för att oxider skall bildas, dvs. reducerande miljöer innebär ofta **stora** korrosionsrisker. Exempel på när reducerande miljöer bildas i en panna är vid ofullständig förbränning och förbränning med luftunderskott så att kolmonoxid, CO, bildas i stället för koldioxid CO<sub>2</sub>. Den lokalt reducerande miljön förhindrar uppbyggnaden av oxidskiktet och därmed blir metallen mer känslig för angrepp av exempelvis kol och kväve.

#### *Saltsmältakorrosion*

Oxidskiktet kan också brytas ner av andra ämnen som gärna reagerar med syre. Om det i kontakt med oxiden bildas en smälta innehållande något av dessa ämnen kommer oxiden att lösas upp. Ett exempel på ett ämne som gärna reagerar med oxid, och som dessutom tenderar att sänka smältpunkten på de salter som ofta återfinns på överhettarna, är klor. Kaliumklorid, KCl är känt som ett ämne som orsakar gropfrätning på överhettare. Även svavel tenderar att bilda lågsmältande produkter på överhettartytor men vid högre temperaturer. De är förknippade med mycket lägre korrosionshastigheter än alkalialter. Svavel ett korrosionsproblem främst i kolpannor.

Bly och zink är ämnen som bildar alkalialter med låga smältpunkter.

Saltsmältakorrosion kan därför uppstå på överhettartuber redan vid relativt låga ångdata om bränslet har innehåll av bly och/eller zink. Även på eldstadstuber är det vanligt med saltsmältakorrosion under sådana förhållanden. Returträ och avfall är vanliga bränslen som ofta har betydande halter bly och zink utöver alkali och klor. Figur 1.5–26 visar en överhettartub av låglegerat varmhållfast stål som har drabbats av saltsmältakorrosion.

Saltsmältakorrosion är förknippad med höga korrosionshastigheter som i regel är mycket högre än andra typer av korrosion av överhettare och eldstadstuber. I syfte att få ned korrosionshastigheterna har mer eller mindre höglegerade austenitiska rostfria stål samt nickelbaslegeringar blivit allt vanligare i eldstad och i överhettare. Även med sådana material kan det bli oacceptabla korrosionshastigheter. I sådana fall är fler åtgärder nödvändiga än att välja ett motståndskraftigt material, t.ex. dosering med svavel (etablerad metod för överhettare) eller samförbränning med svavelhaltiga bränslen, byte och regenerering av bädd material i fluidbäddpannor och ändra temperaturprofilen i pannan.



**Figur 1.5-25. Överhettartub som har utsatts för saltsmältakorrosion.**

**Figure 1.5-25. Superheater tube attacked by an alkaline salt melt.**

Under de senaste 15 åren har mycket forskning lagts ned för att öka förståelsen för överhettar- och eldstadskorrosion, inte minst inom Värmeforsk. De mekanismer som styr saltsmältakorrosion är dock ännu inte helt klarlagda. Det finns många Värmeforskrapporter på området som kan sökas på Värmeforsks rapportdatabas.

#### *Sulfidisering*

Om svavel finns i atmosfären och miljön samtidigt är reducerande bildas sulfid i stället för oxid. Sulfidskikten har dock inte samma passiverande egenskaper som oxidskikten: diffusionen genom sulfiden går snabbare och de har lägre smältpunkt. Risken för skalning är därför högre än för motsvarande oxid. Nickel är ett exempel på ett ämne som har stor benägenhet att reagera med svavel. Effekten av hög nickelhalt blir att sulfid bildas på bekostnad av oxid, varför skalningstemperaturen sänks.

#### *Korrosiva gaser*

Vissa ämnen, speciellt halogener, dvs. fluor; F, klor; Cl, brom; Br och jod, I, är i gasfas väldigt korrosiva mot metalliska material. Fluor är den kanske mest aggressiva, men klor är den utan tvekan vanligaste förekommande. Även vätesulfid,  $H_2S$  och svaveldioxid,  $SO_2$ , är korrosiva i gasform. De här ämnena bildar icke skyddande fasta korrosionsprodukter eller, som i fallet klor, gasformiga metallföreningar som diffunderar bort från ytan.

#### *Positiv effekt av svavel*

Även om svavel tenderar att bilda lågsmltande produkter på överhettarytor är effekten av svavel är inte enbart negativ. Det har nämligen visat sig att svavel inhiberar den kloridinducerade korrosionen som beskrevs ovan. Svavel omvandlar kaliumkloriden, som är en av de mest korrosiva föreningarna som kan bildas på överhettarna, till en betydligt mindre korrosiv saltsyra,  $HCl$ . Saltsyra är visserligen känd som en mycket korrosiv syra, men då den befinner sig i gasform, vilket den gör vid dessa temperaturer, är den betydligt mindre korrosiv än smält  $KCl$ . Flera undersökningar har påvisat denna effekt och betonat vikten av ett högt  $S/Cl$ -förhållande (Henderson 2000). Många av de problem med överhettarkorrosion som

rapporterats från biobränsleeldade pannor kan förklaras med ovanstående resonemang. Många biobränslen innehåller nämligen mycket klor, men lite svavel.

#### 1.5.4 Miljöinducerad sprickbildning

Spänningskorrosion ingår tillsammans med töjningsinducerad sprickbildning och korrosionsutmattning i den grupp som i korrosionsläran brukar kallas *miljöbetingad sprickbildning*. Ibland räknas även väteförspredning och andra sprickbildningsfenomen som orsakas av vätes indiffusion i metallgittret (Jones 1992). För korrosionsutmattning hänvisas till **avsnitt 1.5.1.5**. Spänningskorrosion, töjningsinducerad sprickbildning och några olika typer av väteinducerad sprickbildning beskrivs nedan.

##### 1.5.4.1 Spänningskorrosionssprickning

Spänningskorrosionssprickning, på engelska *Stress Corrosion Cracking*, förkortat SCC, orsakas av samtidig korrosion och statiska dragspänningar över en viss storlek. Temperaturen har i regel också en avgörande betydelse för om SCC ska kunna bildas.

Dragspänningarna kan ha olika ursprung: egenspänningar från tidigare kalldeformation eller tillsatsspänningar genom direkt belastning. De egenspänningar som blir kvar runt materialet efter svetsning är i många fall tillräckliga för att orsaka SCC. Spännings-korrosionssprickor initieras på materialets yta, gärna vid porositeter, repor eller andra ytdefekter, och tillväxer sedan vinkelrät mot dragspänningriktningen.

Tillväxten kan ske mellan kornen i den metallografiska strukturen, s.k. *interkristallin* SCC, eller rakt igenom kornen, s.k. *transkristallin* SCC. Den transkristallina varianten är betydligt vanligare än den interkristallina som nästan uteslutande drabbar rostfria stål i heta syrerika vatten i kärnkraftreaktorer av kokartyp (Mattsson 1987). Det finns många föreslagna teorier till mekanismen bakom spänningskorrosionssprickning, men att förklara dessa ligger över ambitionsnivån för detta avsnitt. För den intresserade hänvisas i stället till den översikt som ges i referens (Jones 1992).

Spänningskorrosionssprickor uppvisar ett karaktäristiskt utseende med en rikligt förgrenad struktur. När inga andra korrosionsmekanismer är verksamma bildas i regel inga korrosionsprodukter, varför korrosionstypen kan vara mycket svår att upptäcka. Typiska exempel på en spänningskorrosionsspricka visas i Figur 1.5–21 och 1.5–22.





Figur 1.5-21. Spänningskorrosionssprickor i en tub av austenitiskt rostfritt stål SS-stål 2343 [DNV AB].

Figure 1.5-21. Stress corrosion cracks in austenitic stainless steel type 316 [DNV AB].



Figur 1.5-22. Spänningskorrosion i ett tvärsnitt av en komponent av austenitiskt rostfritt stål SS-stål 2343. Till höger i bild syns en smältgräns samt svetsgods [DNV AB].

Figure 1.5-22. Stress corrosion cracks in a cross-section of a component of austenitic stainless steel type 316. On the right hand side a fusion line and weld metal can be seen [DNV AB].

Risken för SCC är mest utpräglad hos vissa legeringar i kombination med specifika miljöer. Det mest kända exemplet är kanske austenitiskt rostfritt stål i kombination med kloridlösningar av temperaturer över ca 50 °C (Avesta Sheffield 1999). SCC kan också uppstå hos stål och rostfria stål i alkalisk miljö. S.k. *alkalisk spänningskorrosionssprickning* eller *lutsprödhet* uppstår i lösningar med pH-värden över ca 14 och temperaturer över ca 120 °C. Ett annat exempel på en kombination av material och



miljö som under inverkan av dragspänningar kan resultera i SCC är koppar och kopparlegeringar i fuktig ammoniak.

#### 1.5.4.2 Töjningsinducerad korrosionssprickning

Töjningsinducerad korrosionssprickning, på engelska *Strain Induced Corrosion Cracking*, förkortat SICC, är en skademekanism vanligen förekommer i ferritiska stål i samband med syrehaltigt vatten och hög spänning. En förutsättning för att SICC ska bildas är att spänningen är så hög att det uppstår sprickor i det skyddande vattensidiga oxidskiktet, magnetiten. Magnetiten spricker för att förlängningsvärdet är relativt lågt. Redan vid en töjning på 0,1 % börjar magnetiten spricka. Ju högre spänningar som uppstår i ett tryckkärl, desto större blir den elastiska deformationen och desto större risk är det att det uppstår sprickor i magnetiten. Med höghållfasta stål tillåts spänningarna bli betydligt högre än för mer ordinära stål. T.ex. har Fortiweld, som är sprickbenäget med avseende på SICC, en sträckgräns på omkring 440 MPa medan Altherm 55, ett vanligt material i domar som är betydligt mindre sprickbenäget, har en sträckgräns på 335 MPa.

Den andra förutsättningen för att SICC ska uppstå är att det blir korrosionsangrepp i botten av sprickorna i magnetiten. Under normal drift av en panna ska pannvattnet vara avgasat till en syrehaltsnivå som inte utgör risk för korrosion. Ny magnetit bildas i fall av sprickor i magnetiten. Det gäller dock endast så länge som pannan är i drift och är belastad. Då trycket tas ned till 0 vid ett stopp kommer det in luft i systemet och syrehalten höjs temporärt i pannvattnet. Vid följande start ökar lasten och spänningarna. Lufttillförseln upphör när pannan belastas och syrehalten i vattnet sjunker efter en kort tids drift till önskvärd låg nivå som effekt av avgasningen.

Under en start stoppsekvens erhålls en sammanlagd effekt av hög spänning som medger sprickor i magnetiten och en syrehalt som medger korrosion enligt följande förlopp: i) nedlastning, då magnetit kan spricka pga. tryckspänning, ii) avlastat tillstånd då det kan bildas en liten frätgrop i botten av sprickan och iii) upplastning, då magnetiten spricker i botten av frätgropen och det kan hinna korrodera lite till innan syrehalten blir tillräckligt låg för att korrosionen ska upphöra.

För varje stopp/start-sekvens sker spricktillväxt. Spricktillväxthastigheten per cykel är spänningsberoende. Vid baslastdrift med mycket få starter per år blir spricktillväxten långsam med avseende på tid. Vid cyklisk drift kan spricktillväxthastigheten bli relativt hög med avseende på tid.

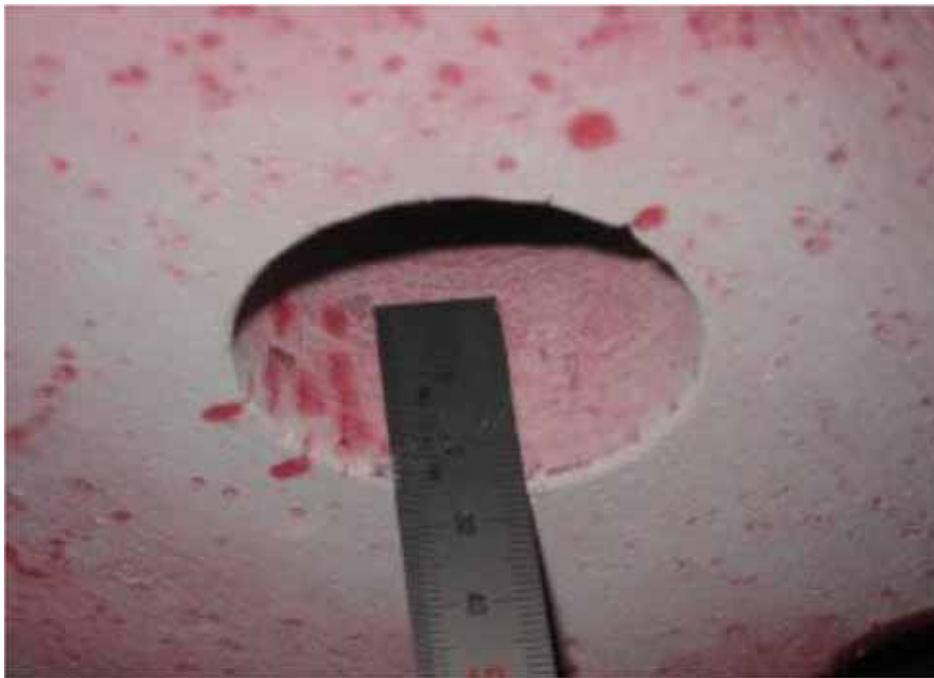
SICC uppstår i första hand i områden med spänningskoncentrationer eller intill svetsar i vattenberörda komponenter. Ångdomar erhåller höga spänningskoncentrationer på insidan vid genomföringar. I den vattenfyllda, undre, delen, t.ex. genomföringar för fallrör och stigrör är SICC är vanligt förekommande hos domar som är tillverkade av höghållfasta stål men det förekommer även hos ångdomar tillverkade av material med mer ordinär hållfasthet. Figur 1.5–23 visar en SICC vid genomföringar av en ångdom. Figur 1.5–24 visar en analys av spänningsfördelningen i en ångdom i drift. Röd färg motsvarar de högsta spänningarna, dvs. i samma områden som sprickorna förekommer. De stora spänningskoncentrationerna kan innebära att sprickor i dessa områden blir kritiska med avseende på ångdomens integritet redan vid relativt små sprickstorlekar.

Väggådor och ekonomiserådor har också genomföringar men spänningarna är i regel lägre och materialen mindre hållfasta, jämfört med ångdomen. Hos dessa komponenter förekommer SICC främst i pannor med kontinuerligt förhöjd syrehalt i pannvattnet.

I komponenter som matarvattentankar och ångackumulatorer kan SICC förekomma i mantelsvetsar. Spänningskorrosionsprickning är dock den vanligaste formen av miljöinducerad sprickbildning i dessa fall. Kvarvarande svetsegenspänningar efter avspänningsglödning bidrar till sprickbildningen. Sprickbildning i kälsvetsar till mantel för stag, inredning etc. är dock ofta orsakade av SICC.

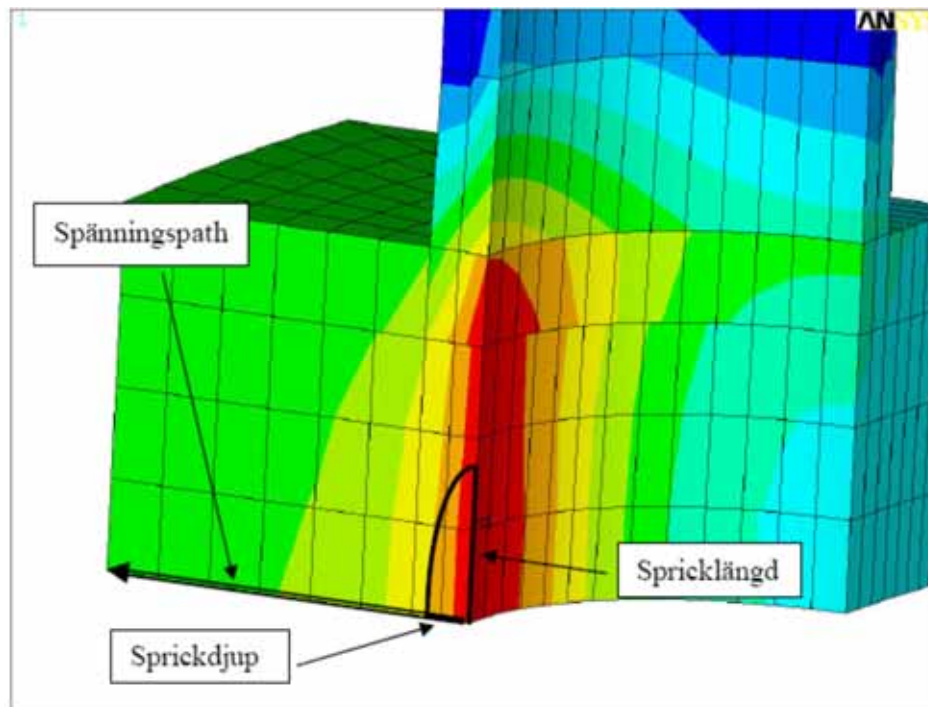
SICC är dessutom vanligt förekommande i eldstadstuber. Det gäller sådana tuber som är inspända och inte kan röra sig tillräckligt fritt vid den termiska expansion som sker vid starter. På tubernas insida bildas SICC i de områden som erhåller kraftigt förhöjda spänningar. T.ex. tuber som har fler än två fenor eller en dubbelfena kan erhålla SICC längs tuben. Svetsade stag etc. mot tub, svetsning mellan vägg och andra plan, t.ex. botten, särskilt om så kallade filler blocks används för att täppa till hålrum mellan det kurviga väggplanet mot andra plan. SICC i eldstadstuber kan orsaka allvarliga olyckor i och med att tuber kan fläkas ut mot pannhuset utan förvarning. Det är svårt att

SICC kännetecknas av kraftiga korrosionsangrepp längs sprickkanterna. Figur 1.5–25 visar ett tvärsnitt av en töjningsinducerad korrosionsspricka.



Figur 1.5–23. SICC vid genomföring av ångdom, detekterat med penetrantprovning (PT).

Figure 1.5–23. SICC at a steam drum tube hole, detected by penetrant testing (PT).



Figur 1.5–24. Spänningsfördelning vid en genomföring av en ångdom. Röd färg indikerar de högsta spänningarna och klarblå de lägsta. Av symmetriskäl är endast en fjärdedel av tubhållets omkrets modellerad. Notera överensstämmelsen mellan området med högst spänningskoncentration och området med sprickbildning i figuren ovan.

Figure 1.5-24. Stress distribution at a tube hole in a steam drum. Red and clear blue colours indicate high stress concentration and low stresses, respectively. Due to symmetry only a fourth of the tube hole is modelled. Note the good agreement between the area with the highest stress concentrations and the cracked are in the figure above.

### 1.5.5 Väterelaterade sprickfenomen

En mängd olika skadetyper kan uppstå när väte diffunderar in i ett metallgitter. I flera fall är det frågan om vitt skilda fenomen som ger upphov till helt olika typer av skador, men med det gemensamt att de orsakats av att väte tillåtits diffundera in i metallen någon gång under drift eller vid tillverkning, vid ytbehandling eller vid svetsning med fuktiga elektroder. Med ett gemensamt namn skulle man kunna kalla de fenomenen för *väterelaterade skador*.

De väterelaterade skadorna innebär inte alltid någon anodisk upplösning av metallen, men om viss grad av allmänkorrosion sker på ytan av metallen kommer dennas katodprocess att ha en avgörande betydelse. Katodreaktionen innebär nämligen under vissa omständigheter reduktion av vattnets vätejoner under bildning av vätgas och genom vidare reaktioner kan atomärt väte diffundera från ytan in i metallgittret.

De flesta av de väterelaterade skadorna orsakas av våt vätesulfid,  $H_2S$ , varför detta är ett stort problem vid hantering av petroleumprodukter. Ett av de väterelaterade sprickbildningsfenomenen, nämligen *väteförspredning*, är dock av mer allmänt intresse.

#### 1.5.5.1 Väteförspredning

Resultatet av ökad halt väte i stål är i regel sänkning av duktiliteten. Väteatomerna fastnar nämligen på dislokationer i den metallografiska strukturen och låser dessa, vilket resulterar i minskad duktilitet. Den minskade duktiliteten visar sig som en

sänkning av sträckgränsen **samt förlängningsvärdet** hos materialet och kan påvisas genom ett dragprov. Eftersom materialet blir sprödare kallas fenomenet *väteförsprödning*. Materialet är försprödat bara så länge vätet finns kvar i metallgittret: om det tillåts försvinna återfår materialet sina ursprungliga egenskaper.

Det är främst de höghållfasta stålen som är känsliga för väteförsprödning, medan duktila material eller material som värmebehandlats efter svetsning är mindre känsliga. Väteförsprödning kan även öka risken för spänningskorrosion (Shreir 1998). Speciellt stor är risken i anslutning till svetsar, där materialet kan vara väteförsprödat på grund av fukt på elektroderna och där **svetsegen**spänningar finns kvar.

Vissa material, exempelvis titan, är känsligt för försprödning på ett annat sätt. Väteupptagning gör att spröda hydridfaser bildas inuti metallen. Dessa hydrider är svåra att upplösa genom värmebehandling, men man kan lyckas genom värmebehandling i vacuum.

## REFERENSER

- Mattsson E. 1987. Elektrokemi och korrosionslära // Bulletin 100, Korrosionsinstitutet.
- Jones D. A. 1992. Principles and Prevention of Corrosion, Macmillan Publishing Company, ISBN 0-02-946439-0 // ASM International, Materials Park, Ohio. ISBN 0-87170-441-2.
- Avesta Sheffield. 1999. Corrosion Handbook for Stainless Steels, Eighth Edition, Avesta Sheffield AB.
- Shreir L. L. 1998. Corrosion, Butterworth-Heinemann, Oxford
- Henderson P., Kjörk A., Ljung P., Nyström O. & Skog E. 2000. Överhettarkorrosion i bioeldade anläggningar – status, Värmeforskrappport 700.

### 1.5.6 Erosion

Erosion är förknippat med materialavverkning orsakat av en strömmande gas eller vätska som kan men inte behöver innehålla fasta partiklar (*fluid*). Olika typer förekommer:

- Abrasiv partikelerosion, där avverkningen främst orsakas av en partikelström som är nära på parallell med den utsatta ytan.
- Partikelerosion med slaginverkan, där avverkningen främst orsakas av en nära på rätvinklig partikelström på den utsatta ytan.
- Droppererosion, där vätskedroppar med hög hastighet åstadkommer avverkning.
- Kavitationserosion, där följande (förenklade) förlopp åstadkommer avverkning: Vätskor kan försättas i tillstånd då gasbubblor (kavitationer) bildas och kollapsar. Kollapsen sker med en sådan kraft att den orsakar avverkning på en utsatt yta.

Erosion av ovanstående typer verkar utan kemiska reaktioner. Då sådana är inblandade talar man om erosionskorrosion vilket är vanligt förekommande och behandlas i ett separat avsnitt.

#### Partikelerosion

Då partiklar orsakar erosionen kan detta ske genom ett flertal olika mekanismer. Som exempel kan skärning, plogning, extrudering, fragmentering, elastiskt brott, elastisk-

plastiskt brott och smältning nämnas. Verkande mekanismer beror på partiklarnas storlek, sammansättning, form, hastighet och angreppsvinkel. Dessutom har den angripna ytans sammansättning och mikrostruktur betydelse för vilka mekanismer som kan verka.

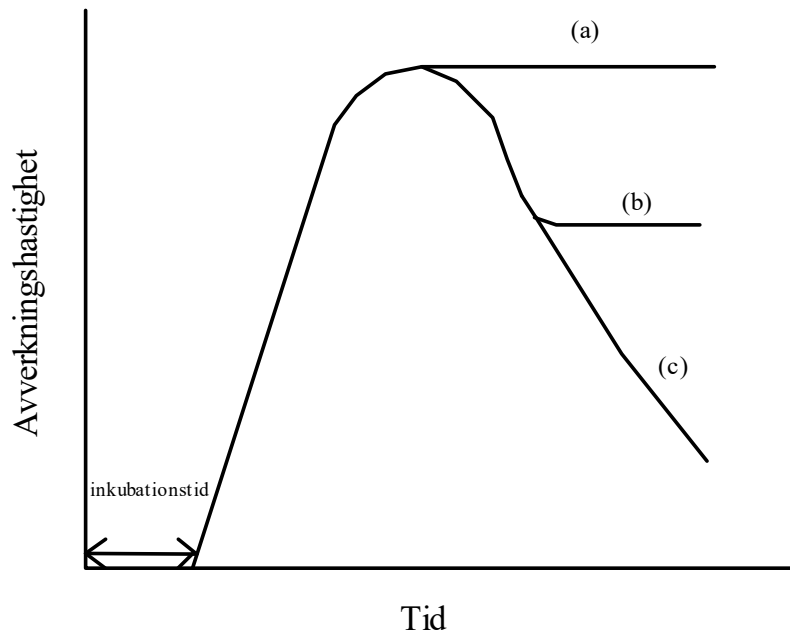
Erosionsförloppen kan vara olikartade vilket visas schematiskt i Figur 1.5–23. Ofta föregås partikelerosion av en inkubationsperiod utan eller med en liten avverkning. Sedan följer under en tid en accelererande avverkning upp till en viss avverkningshastighet som i fortsättningen övergår till att vara konstant, kurva (a) i Figur 1.5–26. I vissa fall avtar avverkningshastigheten i fortsättningen, man får en topp i avverkningshastighet som funktion av tiden. I sådana fall kan avverkningshastigheten antingen minska till en viss nivå då en konstant avverkningshastighet uppstår, kurva (b) eller fortsätta att minska mot allt lägre värden, kurva (c).

Ett antal analytiska modeller har föreslagits för att kunna beskriva och förutsäga partikelerosion mer i detalj men de har alla på grund av partikelerosionens komplexitet ett begränsat värde. De flesta mekanistiska modeller beaktar endast konstanta avverkningshastigheter i erosionsförloppet.

Partikelerosionen uppvisar skilda effekter då duktila och spröda material jämförs. Till exempel är duktila material mer känsliga för abrasiv partikelerosion och mindre känsliga för partikelerosion med slaginverkan än spröda. Olika material kan sedan vara allt mellan mycket duktila och mycket spröda.

Till exempel har abrasiv partikelerosion på duktila material kunnat iakttas ske i två steg. Först plogar partikeln upp ett spår eller skär, likt vid svarvning, ut en spåna. En liten kant uppstår som följd av detta. I nästa steg slås denna kant bort av andra partiklar. På spröda material med stor infallsvinkel av partiklar förknippas erosionen med sprickbildning av de spänningar som de anslående partiklarna åstadkommer. Även ett material som deformationshårdnar av partikelströmmen kan erhålla sådan sprickning om deformationshårdnandet blir tillräckligt stort. Ökad temperatur kan åtminstone för abrasiv partikelerosion ge en ökad avverkningshastighet.

Partikelerosion är till exempel vanligt förekommande på pannväggar i pannor med fluidiserad bädd, se [avsnitt 2.1.1](#), och på överhettartuber, se [avsnitt 2.1.5](#). Om partikelerosion har konstaterats kan det vara värt att värdera de parametrar som kan ha orsakat skadan. De är som ovan nämnt flertaliga men en utvärdering av var och en ger underlag till att identifiera lämpliga åtgärder.



Figur 1.5-26 Olika förlopp av erosionsangrepp vid partiklerosion.

Figure 1.5-26 Different characters of erosion attack at particle erosion.

### Dropperosion

Vätskedroppar med hög hastighet kan åstadkomma erosionsangrepp. Lokala tryckspänningar uppstår i ett utsatt material då det träffas av dropparna och om dessa spänningar når upp till sträckgränsen kan erosion uppstå. I duktila material är det första steget att dropparna deformerar ytan så att en grund krater bildas.

Deformationen resulterar i ett deformationshårdnande som tilltar med antalet droppträffar och till slut blir materialet så sprött att fortsatta droppträffar leder till sprickbildning. I spröda material kan sprickbildningen uppstå mer eller mindre momentant. Den tid som åtgår innan sprickbildningen uppstår förknippas med en inkubationstid för erosionen. Sprickorna, som alltså är mycket små, bildas i fall av föregående kraterbildning i kraterns botten. De kan även bildas vid ytråheter intill kratrarnas ovankanter. När sprickorna blivit tillräckligt många kan små bitar av materialet ryckas ut vid fortsatt angrepp. Mönstret av de erosionshastigheter som med tiden uppträder för dropperosion liknar fall (b) i Figur 1.5-23 ovan. Den sista delen i erosionsförloppet med konstant avverkningshastighet i figuren kan dock fluktuera på ett oförutsägbart sätt.

Andra inverkanseffekter på dropperosionen är:

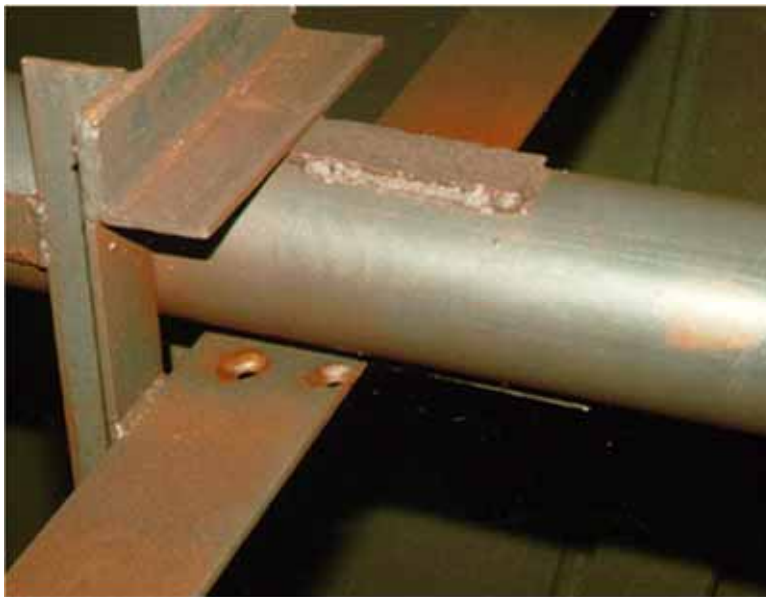
- Dropphastighet, som har en stark inverkan på avverkningshastighet.
- Droppstorlek, där större droppar ger större avverkningshastighet.
- Materialegenskaper, där hårdheten inte sällan kan användas för att uppskatta ett materials motstånd mot dropperosion. Ett materials utmattningshållfasthet har också stor betydelse för motståndet mot dropperosion. Detta är förklarligt eftersom sprickningen uppstår till följd av angrepp av en mångfald droppar vilket har likheter med högcykelutmattnings många belastningscykler.
- Anslagsvinkel, där en rät vinkel utgör det värsta fallet.



Det finns empiriska formler som ungefärligt kan beskriva droppkorrosion. För till exempel kolstål har det även tagits fram värden på dropphastighet och droppstorlek där risken för droppkorrosion börjar bli betydande. Utsatta komponenter är dock ofta förknippade med lokala variationer vilket är avgörande för om och i vilken grad dropperosion är ett problem och dessa lokala variationer är ofta svåra att beräkna.

Områden angripna av dropperosion visar ofta en rå smärgelduksliknande yta. I kolstål och låglegerade stål förekommer dropperosionsangrepp nästan alltid i kombination med erosionskorrosion och allmänna korrosionsangrepp. Tidigare uppfattades korrosion som en nödvändig grund till dropperosion men det har kunnat visas att så inte alls är fallet.

Dropperosion är vanligt förekommande i till exempel i värmekondensorer, turbinshus och turbinhus. Tuber är mest kritiska på grund av den ringa godstjockleken. Skador uppstår av naturliga skäl endast där en accelererad ångström med vattendroppar kan verka. Tuber som är skuggade av andra tuber undgår angrepp. Även höljen, balkar och stödplåtar angrips men de är inte lika kritiska. I figur 1.5-27 visas ett exempel på dropperosion i en stödbalk.



**Figur 1.5-27** Två borteroderade punkter i en stödbalk i en matarvattentank. Det eroderande mediet har varit en vatten-ånga blandning [ÅF-IPK AB].

**Figure 1.5-27** Two eroded spots on a support beam in a feed water tank. The eroding media has been a steam-water mix [ÅF-IPK AB].

### Kavitation

Kavitation är nära besläktad med dropperosion. Kavitation orsakas av ångblåsor som kollapsar vid en snabb tryckökning. Vatten strömmar då med hög hastighet in för att fylla upp den volym som nyss upptogs av ångblåsan. Om detta sker tillräckligt nära en yta tillräckligt ofta kan materialet skadas. Vid låg belastning skadas ofta bara materialets oxidskikt. Vid en hög belastning kan en lokal utmattning som är lik den som observerats för dropperosion uppstå.



Risken för kavitationsskador är störst i vatten där trycket och temperaturen ligger nära mättnadstillståndet. Mindre variationer medför då att ångblåsor bildas och momentant kollapsar. Risken ökar med minskande tryck och ökande vattenhastighet. En hög lokal turbulens kan ofta vara en utlösande faktor. Sugsidan i pumpar och utlopp i ventiler drabbas ofta av kavitationsskador. I värmeväxlartuber har ibland tubsvängningar kunnat ge trycksvängningar som förorsakat kavitation (EPRI-GS-7390).

Turbulent strömning av en fluid över en yta ökar förutsättningarna för erosion. Metaller har en viss hastighetsgräns då passivlagret försvinner på grund av den turbulenta strömningen över ytan. Inerta material av typen keramer och plaster saknar denna gräns. Erosion av en fluid kan också uppkomma där strömningsskilderna störs. Vanliga platser är vid skarpa vinklingar av rör, vid ventiler eller där saker sticker in i rörgången. Ett exempel är svetsskägg i en rörsvets som kan sticka ut och störa strömningen. Det är inte heller ovanligt att erosionsskador uppkommer som en sekundärskada vid ett läckage av ånga.

Då erosionsskador uppstått är det vanligt att ändra påkänningarna i syfte att få erosionen att upphöra. Att ta reda på bakomliggande orsaker till skadan är då av central betydelse. Ibland kan nödvändiga förändringar innebära en oacceptabel reduktion i komponentens, systemets eller anläggningsdelen utnyttjandegrad. Då är byte till eller beläggning med erosionsbeständigare material lämpliga åtgärder. Att optimera ett materialval är ofta en komplex uppgift vid problem med erosion, särskilt om även andra livslängdsbegränsande mekanismer samtidigt förekommer. Kännedom om bakomliggande mekanismer till skadan är av grundläggande betydelse för att lyckas med detta. Åtgärder med beläggningar är vanligt förekommande om det är praktiskt möjligt i det aktuella fallet. För att lyckas med beläggningar tillkommer att beakta problematik som kan föreligga vad gäller deras vidhäftning.

## REFERENSER

EPRI-GS-7390. Manual for Investigation and Correction of Feedwater Heater Failures.

### 1.5.7 Erosionskorrosion

En fysisk samverkan mellan erosion och korrosion kan förekomma vid extrema strömningshastigheter. Sådana kan uppstå i gasturbiner där skovlars framkanter kan få angrepp på grund av de höga gashastigheterna i samverkan med högtemperaturkorrosion (**avsnitt 1.5.3.2.9**). Begreppet erosionskorrosion omfattar dock i de flesta fall effekten av att ökad strömningshastighet ger en ökad masstransport och därmed en ökad korrosionshastighet. Strömningsinducerad korrosion, på engelska *Fluid Assisted Corrosion* (FAC), skulle därför vara ett mer korrekt uttryck för dessa fall.

Erosionskorrosion är vanligt förekommande i komponenter av kolstål och låglegerat stål som utsätts för fuktig ånga. Värmekondensorer, förvärmare och mellanöverhettare samt i turbiner: hus, mellanväggar och rotorerna, får ofta skador. Det är i stor utsträckning på sådana komponenter där dropperosion uppträder men mekanismerna är helt olika. Erosionskorrosionsangreppens utbredning och djup i turbiner har varierat i stor utsträckning från anläggning till anläggning. I värmekondensorer och förvärmare är angreppen vanligen utsträckt men lokaliserade till de yttre tubraderna med hög ånghastighet. Angreppsdjupen varierar. Vid erosionskorrosion i fuktig ånga är angreppsytan ofta relativt slät med en ljusgrå till svart oxidfilm som är mycket tunn.

Erosionskorrosion i form av flödesinducerad korrosion förekommer även i vattenmiljö med höga strömningshastigheter, t.ex. matarvattenledningar. Det är i områden som erhåller förhöjda flödes hastigheter och virvelbildning som i första hand drabbas.

Erosionskorrosion i fuktig ånga uppstår på grund av att järn löser sig i vatten men det krävs också att det lösta järnet transporteras bort i betydande mängd istället för att med syre bilda ett skyddande oxidskikt. En kondenserad vätskefilm på ytan med hög strömningshastighet eller hög turbulens ger förutsättningar för detta. Processen sker genom ett antal steg:

1. Anodisk upplösning av järn i en gränsyta mellan järn och vatten där järnet bildar järnhydroxid. Sådana gränsytor finns i porer och sprickor av oxidskikt. Järnhydroxiden bildar sedan magnetit ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ).
2. Delar av den bildade magnetiten belägger gränsytan medan resten av magnetiten och eventuell oomvandlad järnhydroxid transporteras ut ur porerna och sprickorna genom diffusion.
3. Om tillräckligt med väte finns i omgivningen kan magnetiten bli kemiskt upplöst till hydroxider.
4. Som ett resultat av masstransport i den strömmande vätskefilmen intill ytan förs upplöst magnetit och andra korrosionsprodukter iväg så att koncentrationerna av dessa hamnar under mättnadsnivå i porens övre delar och vid gränsytor mellan oxid och vatten. Processen får alltså möjlighet att hela tiden fortsätta.
5. En ökad intensitet av korrosionsreagenter från den kondenserade vätskefilmen som förs till gränsytor mellan oxid och vatten ger en ökad gradient av deras koncentration genom porerna vilket i sin tur innebär att diffusionshastigheten ned till metallytan ökar.

Vid ett långsamt flöde av vätskefilmen bildas så tjocka oxidskikt att ovan beskrivna upplösning och borttransport av järn genom porer blir långsam och kan avta helt. Bildningen av magnetit på ytan sker snabbare än upplösningen.

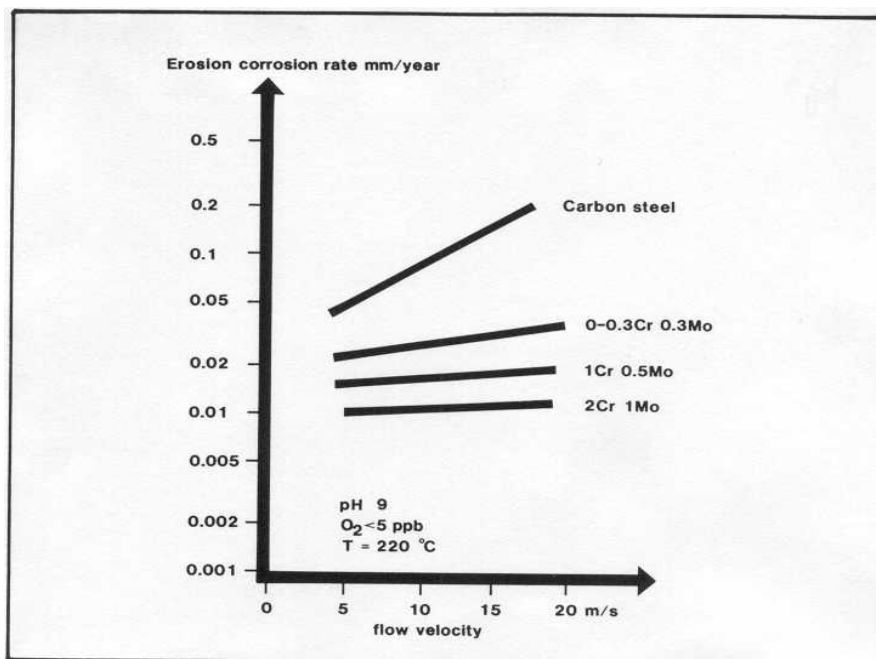
När strömningshastigheten eller turbulensen av vätskefilmen är hög blir oxidskikten tunnare och den ovan beskrivna processen av upplösning och borttransport av järn kan ta fart och åstadkomma erosionskorrosion.

Följande faktorer inverkar på erosionskorrosionen:

- Strömningshastighet
- Temperatur
- Fukthalt
- Syrehalt
- pH-värde
- Material

#### Strömningshastighet

Angreppshastigheten ökar med ökande strömningshastighet eller turbulens. Figur 1.5–28 visar erosionskorrosionens hastighet som funktion av strömningshastigheten för kolstål och några låglegerade stål vid en uppsättning av konstant pH, syrehalt och temperatur. Från figuren framgår det att strömningshastigheten har stor inverkan på kolstål. Denna inverkan minskar då materialets legeringshalt ökar och är liten för det låglegerade stål i försöken med högst legeringshalt.



Figur 1.5–28. Inverkan av strömningshastighet vid erosionskorrosionsförsök i konventionell alkalisk miljö (Tavast 1994).

Figure 1.5-28. Influence of flow velocity at erosion corrosion trials in a conventional alkaline environment (Tavast 1994).

För att åtgärda erosionskorrosion ger minskad strömningshastighet i sig generellt en måttlig effekt på angreppshastigheten och det är i praktiken ofta inte lönt av processtekniska skäl. En effektivare åtgärd är att minska eller eliminera turbulensen om sådana förhållanden föreligger.

#### Temperatur

Lösligheten av järn ökar med ökande temperatur. Samtidigt underlättas dock skyddsskiktbildningen och vid tillräckligt hög temperatur medför skyddsskiktet en

minskad korrosionshastighet. Vanligtvis blir effekten av detta att angreppshastigheten är som högst vid ca 150°C.

#### pH-värde

Vid konventionell alkalisk vattenbehandling är pH-värdet i vattenfasen avgörande för angreppshastigheten. Lösligheten av järn minskar med ökande pH-värde och vid pH-värden på omkring 9,5 och däröver kan angreppshastigheten normalt försummas. Alkaliseringsmedel tillsätts ofta i syfte att höja pH-värdet. I fuktig ånga anrikas dock många alkaliseringsmedel i ångfasen. Ytor som utsätts för det första kondensatet kan då ändå få för låga pH-värden.

#### Fukthalt

I fuktig ånga krävs en viss minsta fukthalt för att man ska få erosionskorrosion. Den kritiska fukthalten varierar med sådana faktorer som temperatur, kemisk miljö och turbulens.

#### Syrehalt

Vid alkalisk vattenbehandling ska syrehalten vara så låg som möjligt men enstaka ppb (ppb=µg/kg) syre har positiv effekt och det kan vara till en nackdel att sträva efter att helt eliminera syret i matarvattnet. Syrehalten i vattenfasen är liksom rätta värden på pH och sur konduktivitet avgörande faktorer vid vattenbehandling som baseras på en viss syrehalt i vattnet, så kallad kombibehandling (Bjurström 2001). I detta fall medför en högre syrehalt reducerad angreppshastighet. Normalt anses en syrehalt mellan 20-50 ppb vara tillräcklig hög för att reducera angreppshastigheten till en acceptabel nivå. Syrehalten i det första kondensatet i fuktig ånga är dock normalt mycket lägre, eftersom syre anrikas i ångfasen.

#### Material

En ökande kromhalt i stålet medför ett ökat motstånd mot erosionskorrosion. Betydande effekter erhålls redan vid relativt låga halter, se Figur 1.5–28. Halten av koppar och molybden har också en viss inverkan. Varierande motståndskraft hos olika charger av kolstål kan därför förklaras av skillnader i halten av krom, molybden och koppar på en låg nivå. Stål med höga kromhalter ger ett mycket gott motstånd i jämförelse med kolstål.

Ny kunskap visar på att erosionskorrosion orsakar skador på tuber i pannor med sandbäddar. Från observationer som gjorts på tuber som utsatts för temperaturer på 500-600°C kan det antas att partikelbombardemanget skapar sprickor och andra defekter i yttoxiden. Genom dessa transporteras syre till gränsytan mellan oxid och metall, som därigenom oxideras under bildandet av en tjock oxidfilm (Olefjord 2000).

**REFERENSER**

- Bjurström H. 2001. Handbok i vattenkemi för energianläggningar, Värmeforsk.
- Olefjord I. 2000. Erosionskorrosion, Värmeforsk, Korrosion och beläggningar hos värmeöverföringsytor, 8 och 9 mars 2000.
- Tavast J. 1994. Skademekanismer i värmekondensorer, Värmeforskrapport 500.
- Tomarov G V. 1989. Erosion-corrosion of the structural materials of saturated steam turbines, Thermal Engineering 36 (7).

### 1.5.8 Försprödning

Försprödning används ofta som ett samlande begrepp för fenomen som ger försämrade mekaniska deformationsegenskaper (seghetsegenskaper). Försprödande mekanismer är av grundläggande skild natur mellan till exempel metalliska och polymera material. För metalliska material kan de delas in i olika kategorier. Huvudkategorierna är tillverkningsinducerad och omgivningsinducerad försprödning. Denna indelning är av praktiskt syfte på så sätt att effekterna av tillverkningsinducerad försprödning finns i en komponent redan från början medan de omgivningsinducerade effekterna gradvis ökar med användningstiden. Detta understryker det faktum att inverkan från de två kategorierna kan behöva beaktas och hanteras på olika sätt vad gäller skadetålighetsanalys och livslängdsbedömning. Det är för den skull inte otänkbart utan tvärt om fullt möjligt att en tillverkningsinducerad försprödning kan spås på med en omgivningsinducerad.

Försprödning inträffar i regel vid förhöjda temperaturer som möjliggör att termiskt aktiverade processer och drivkraft mot jämviktstillstånd (till förändringar) i materialets mikrostruktur kan verka. Liknande mekanismer kan förekomma i de två huvudkategorierna. Skillnaden i sådana fall kan vara att försprödningen sker snabbt vid tillverkning och långsamt i drift på grund av högre temperaturer i tillverkningsprocessen än i driftprocessen. Den tillverkningsinducerade försprödningen är i regel förknippad till någon form av värmebehandling eller svetsning. Det är även vanligt förekommande att ett försprödningsfenomen endast inträffar inom ett begränsat temperaturintervall.

För stål som används i kraftvärmeverk är de viktigaste mekanismerna som kan ge försprödningseffekter diffusion eller segring av föroreningselement samt bildning av karbider och ibland nitrider. Diffusion kan beskrivas som en termiskt aktiverad vandring av atomer till energimässigt mer gynnsamma positioner. Segring innebär att element av en viss koncentration i ett material ansamlar sig till en högre. I det här sammanhanget är det föroreningselement som diffunderar eller segrar till mikrostrukturens korngränser (metalliska material är uppbyggda av en korn/kristallstruktur). Fosfor och väte bidrar starkt till försprödning i olegerade och låglegerade stål. Andra element som ofta hittas ansamlade i försprödade materials korngränser är antimon, tenn och arsenik. Den allmänna uppfattningen är att föroreningarna försvagar bindningsstyrkan i korngränserna. Materialet blir då benäget att spricka i dessa (interkristallina sprickor) vilket kännetecknar sprött brott.

Bildning av karbider innebär att föreningar av inlösta metall- och kolatomer skiljs ut i materialet. Detta sker både i korngränser och inuti kornen och karbidernas storlek är mikroskopisk. Generellt hindrar karbiderna deformation och särskilt om karbidtyper som är relativt små skiljs ut erhålls försprödande effekter i styrka med utskiljningens omfattning. I vissa material skiljs karbidtyper som orsakar försprödning ut med kraft inom begränsade temperaturintervall. Sammansättningen mellan metall och kol i karbiden förändras vid förhöjda temperaturer med tiden i många material. Sådana förändringar kan innebära en större försprödande inverkan. Karbider i korngränser inverkar försprödande genom att försvaga dessa och effekterna har observerats öka tillsammans med föroreningar. Mekanismerna för sådan samverkan är inte helt klarlagda (McMahon 1984), (Scifo 1990).

Det finns flera olika modeller framtagna i syfte att förutsäga försprödningseffekter. Mekanismerna är emellertid förknippade med stor komplexitet (McMahon 1984) och modellerna är baserade på detaljerade studier av specifika material. Därför kan

modellerna se ganska olika ut och de har visat sig vara osäkra att tillämpas allmänt (Ayres 1983).

Olika försprödningstyper som är aktuella för stål som används i kraftvärmeverk kan grupperas enligt Tabell 1.5-1 (Gladh 1996).

**Tabell 1.5-1 Gruppering av försprödningstyper**

| <u>Tillvekningsinducerad försprödning</u>       | <u>Omgivningsinducerad försprödning</u> |
|-------------------------------------------------|-----------------------------------------|
| Anlöst martensitförsprödning                    | Väteförsprödning                        |
| Anlöpningsförsprödning                          | Grafitbildning                          |
| Försprödning orsakad av aluminiumnitridbildning | Krypförsprödning                        |
| Överhettning                                    | Åldringsförsprödning                    |

De typer av försprödning som ställer till med störst problem i kraftvärmeverk beskrivs närmare i det följande. De övriga typerna beskrivs i Värmeforskrappport 579 (Gladh1996).

#### *Anlöpningsförsprödning*

Anlöpningsförsprödning inträffar då ett material hålls i, eller vid uppvärmning och svalning passerar genom, ett kritiskt temperaturintervall som generellt ligger mellan 350 och 650 °C. Försprödningen resulterar i en minskad brottseghet vid rumstemperatur och förhöjda omslagstemperaturer från segt till sprött brott vid slagprovning. Både föroreningar och karbidutskiljning bidrar till försprödningen. En annan effekt av anlöpningsförsprödning är en ökad benägenhet till bildning av att så kallade återvärmningssprickor vid avspänningsglödning av svetsar. Detta gäller speciellt stål med vanadinnehåll. För flera låglegerade och höghållfasta stål är den försprödande utskiljningen särskilt kritisk vid temperaturer runt 590°C och det kan rekommenderas att snabbt passera detta temperaturområde vid en värmebehandling.

#### *Väteförsprödning*

Försprödning som härrör från väte finns i ett flertal former. Dessutom kan det finnas samverkan mellan väteförsprödning och anlöpningsförsprödning, åldringsförsprödning respektive spänningskorrosion. Ett exempel av väteförsprödning som drabbar högttemperaturanläggningar uppstår i kolstål och låglegerade stål. Molekylärt väte skiljs ut vid korngränser och kan snabbt röra sig in i materialet. Detta aktiverar till exempel avkolning och mekanismer som leder till sprickbildning. En förutsättning är en korroderande miljö där molekylärt väte skiljs ut. En typisk sådan är då tjocka insidiga oxider bildas i panntuber (Eyckmans 1999), se vidare [avsnitt 2.1.5 "Panntuber"](#). Väteförsprödning beskrivs ytterligare i [avsnitt 1.5.3.2.7.3](#). En översikt om väteförsprödning ges till exempel i handböcker från ASM (Metals Handbook 1989), (ASM Handbook 1996).

#### *Krypförsprödning*

Krypförsprödning innebär att mekanismer verkar som försämrar materialets krypduktilitet. Karbidutskiljning och kavitetbildning i korngränser då materialet är i drift orsakar sådan försprödning. Karbidutskiljning resulterar dessutom i en utarmning



av legeringsmetallatomer intill korngränserna. Det utarmade materialet kan få försämrade deformationsegenskaper som bidrar till försprödningen.

#### *Åldringsförsprödning*

Mekanismer som styr åldringsförsprödning liknar i stora drag de som gäller för anlöpningsförsprödning men de skadebildande processerna sker under en längre tid och vid lägre temperatur. Omfattningen styrs av materialets sammansättning, mikrostruktur, föroreningshalt, drifttemperatur och drifttid. De vanligaste kromstålen utsätts för åldringsförsprödning vid temperaturer mellan 300 och 600°C.

#### REFERENSER

- ASM Handbook vol. 11, ASM International. 1996. 245-251.
- Ayres P. S., Abston S. B., Bieber D. & Schnellhammer W. 1983. The susceptibility of SA-508-II and SA-533B to reheat cracking-evaluation of empirical and theoretical predictive methods, Nuclear Engineering and Design 76, 391-409.
- Eyckmans M., Verheyden K. & Gijbels S. 1999.
- Hydrogen damage in Belgian utility boilers, Proc. Int. Symp. Case histories on integrity and failures in industry, Milan, Italy, Sep 28th-Oct 1st, eds. V. Bicego, A. Nitta, J. W. H. Price & R. Viswanathan, publ. Engineering Materials Advisory Services LTD, UK.
- Gladh M. & Skog E. 1996. Undersökning av försprödning och försprödningsmekanismer i material vid långa drifttider, Värmeforskrapport 579.
- McMahon; Jr. C. J. 1984. High-Temperature Brittle Fracture in Low Alloy Steels, Z. Metallkde. Vol. 75, 496-509.
- Scifo A. 1990. Embrittlement phenomena and remanent life assessment for chrome-molybdenum steels - Part 1, Welding International 4 (9) 703-713.

## 1.6 OFÖRSTÖRANDE PROVNING

Oförstörande provning är en grundpelare till bedömningar av tillstånd och återstående livslängd av olika mekaniska komponenter i en anläggning. Vid sidan av sådana bedömningar används den oförstörande provningen till kvalitetskontroll av komponenters tillverkning, installation och eventuella reparationer. En av de viktigaste uppgifterna för den oförstörande provningen är då att försäkra sig om att sprickor och defekter inte föreligger som kan äventyra hållfastheten och säkerheten. Vid återkommande oförstörande provning är syftet att undersöka om skador och förändringar har uppstått under drift. Inte sällan påträffas då ursprungliga defekter, till exempel beroende på att metoderna förfinats sedan den ursprungliga kvalitetskontrollen. Samtidigt kan materialen ha åldrats på så sätt att acceptanskriterier för defekter måste ses över och eventuellt ändras.

Oförstörande provning kan i vissa fall tillämpas för att bedöma om materialet har åldrats eller **degenererats**. I andra fall måste mer eller mindre förstörande provning tillgripas för att kunna göra sådana bedömningar. Många gånger är kännedom om utgångstillstånden som referens avgörande för vilka bedömningar som kan göras. Önskvärda referensunderlag saknas ofta till exempel på grund av att dagens kunskaper ofta är större än då anläggningen byggdes. Ibland kan dock provning på delar av komponenten som inte är kritiska fungera som ett referenstillstånd.

I de följande avsnitten i detta kapitel beskrivs olika provningsmetoder som står till buds i syfte att genomföra tillstånds- och livslängdsbedömningar. De som beskrivs är sådana som har väletablerad och generell användning i energianläggningar. Även sådana metoder måste ofta anpassas speciellt för sitt specifika ändamål och det är naturligtvis viktigt att vara väl medveten om metodernas begränsningar. Kombinationer av olika metoder är ofta en framkomlig väg att nå den önskade informationen. Syftet med följande beskrivningar är att väcka intresse och ge ökad förståelse för vilka undersökningar som är nödvändiga eller relevanta i olika sammanhang samt vilka kvalitetskrav man bör ställa på provningen. Beskrivningarna refererar och utgör även referens till andra delar av handboken. En heltäckande bild av vilka metoder som har tillämpning och hur de tillämpas på respektive komponent ges i handbokens andra del om mekaniska komponenter.

Det finns flera mindre kända oförstörande provningsmetoder och specialtillämpningar av vanliga provningsprinciper som utvecklats för tillståndsundersökningar i energianläggningar. Ett antal metoder är även under utveckling. En översikt av sådana metoder ges i Värmeforskrapport 587. En förteckning över internationella standarder för oförstörande provning finns i MNC 1106.

Som en inledning följer i Tabell 1.6-1 en översikt på hur de generellt sett vanligaste oförstörande provningsmetoderna lämpar sig för undersökningar av olika typer av svetsfel.

Tabell 1.6-1 av oförstörande provningsmetod för svetsfel.

| Diskontinuitet           | Lämpliga metoder |    |                  |                  |                  |    |
|--------------------------|------------------|----|------------------|------------------|------------------|----|
|                          | RT               | UT | PT               | MT               | VT               | ET |
| Porer                    | +                | O  | + <sup>1</sup>   | O <sup>2</sup>   | + <sup>1</sup>   | O  |
| Slagg-inneslutningar     | +                | +  | -                | O <sup>2</sup>   | -                | O  |
| Bindfel                  | O                | +  | -                | -                | -                | O  |
| Ofullständig Inträngning | +                | +  | -                | -                | -                | O  |
| Smältdiken               | +                | O  | O                | O                | +                | O  |
| Överrinningar            | -                | O  | +                | +                | O                | O  |
| Sprickor                 | O                | +  | + <sup>1</sup>   | + <sup>2</sup>   | + <sup>1</sup>   | +  |
| Klyvningar               | -                | +  | + <sup>1,3</sup> | + <sup>2,3</sup> | + <sup>1,3</sup> | -  |

Anm.

1. Endast på ytan
2. Endast på och strax under ytan
3. Fogberedning eller plåtkant

**+ = Lämplig metod****O = Marginell användning****- = Inte lämplig metod**

RT = Radiografisk provning MT = Magnetpulverprovning

UT = Ultraljudprovning VT = Visuell inspektion

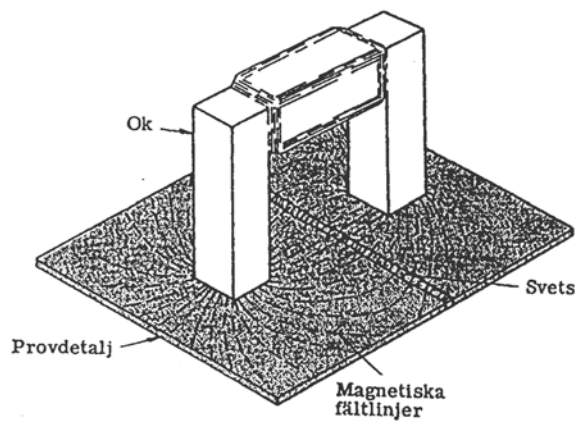
PT = Penetrantprovning ET = Virvelströmsprovning

### 1.6.1 Magnetpulverprovning

Vid magnetpulverprovning (MT) induceras ett magnetfält i ett provobjekt. Förekommer skarpa avbrott i ytan, till exempel en spricka, ett spår eller en kant uppstår ett magnetiskt läckfält. Till detta läckfält kan ett indikeringspulver (järnpulver) attraheras. Pulvret formar med färg och kontrast en indikation som dessutom är betydligt bredare än diskontinuiteten. Därigenom kan ögat uppfatta mycket små fel, ned till ett fåtal µm breda. Även diskontinuiteter strax under ytan kan detekteras. Endast ferromagnetiska material kan provas. För sådana är MT-provning den mest använda OFP-metoden för att detektera ytfel.

I fält används i mycket stor omfattning okmagnetiserad provning med handhållna ok. Denna magnetiseringsmetod skapar ett longitudinellt magnetfält som vanligen får

energi från en strömkälla (elektromagnetiska ok) men det finns även ok med permanentmagneter. Strömstyrka och strömart kan väljas så att bästa resultat erhålls. Med likström kan fel under ytan detekteras på flera millimeters djup medan växelström begränsar detekteringsförmågan till ett mycket litet djup under ytterytan. Magnetfältets riktning, det vill säga sträckan mellan okets skänklar, skall vara nära 90° i förhållande till en spricka för bästa känslighet. Sprickor indikeras bra i vinklar mellan 45 och 90° och provning med två vinkelräta orienteringar vid samma position är praxis för att avsöka ett område. Figur 1.6-1 visar ett handhållet ok. Avståndet mellan polerna på handhållna ok är typiskt 150 mm. Det finns även ok med ställbara skänklar för ökad åtkomlighet. Storleken på fältet avtar med ökande avstånd mellan skänklarna. Provningen bör utföras med överlappningsteknik där minst 50 mm överlappning rekommenderas.



Figur 1.6-1. Handhållet ok för magnetpulverprovning.  
Figure 1.6-1. Hand yoke for magnetic particle testing

Ytorna som oket läggs an mot skall vara så jämna och plana som möjligt. Luftspalter kan leda till att man inte får tillräcklig flödestäthet vid provstället, även om de är små. Metoden kan, som tidigare nämnts bara tillämpas på ferromagnetiska material. Härdade sådana är svärmagnetiserade och kräver högre strömstyrka. Lämpliga strömstyrkor är beroende apparatens detaljutformning varför generella rekommendationer kan inte ges. Krav man bör ställa på operatören är erfarenhet, att hon eller han arbetar kontinuerligt med magnet-pulverprovning och har kännedom om hur man ska få alla de typer av sprickor och defekter man letar efter att uppträda. Detta är av stor betydelse för riktiga resultat skall erhållas. Utöver risken att svårupptäckta men allvarliga sprickor kan missas krävs det skicklighet att kunna särskilja eventuella falska indikationer från indikationer av riktiga defekter. Hög strömstyrka gör kanter och smältgränser vid svetsar mer benägna att framträda som indikationer.

Vid provning av turbinrotorer, -skivor och -blad kan cirkulärmagnetiserad magnetpulver-provning användas. En spole byggs då upp runt rotorn, till exempel med en svetskabel. Närmare beskrivning av sådan teknik återfinns i ref. (EPRI 1984).

Vid provning i fält är magnetpulvret vanligen uppslammat i en bärarvätska. Partiklarna faller i vätskan och tillförd vätska måste vara omrörd under provningen. Partiklarnas rörlighet måste anpassas så att de lätt kan byggas upp kring en diskontinuitet utan samtidigt falla i vätskan för snabbt. Detta innebär en viss kompromiss mellan partikelstorleken och vätskans viskositet. Den viktigaste anledningen till att provningsföremålet måste vara väl rengjort är att bärarvätskans viskositet inte skall riskera bli ogynnsam under provningen. Även inlösning av små mängder smuts kan bli kritiska. Luktfrifotogen och renad kristallolja är exempel på lämpliga bärarvätskor. Även vattenbaserad bärarvätska finns till magnetpulverprovning.

Magnetpulver består till stora delar av rent järn. Pulvret kan dessutom vara fluorescerande vilket ger en klart förbättrad kontrast och synlighet av indikationer, men detta kräver speciella arrangemang. För att partiklarna skall fluorescera måste de bestrålas med ultraviolett (UV) ljus som är osynligt. För att rätt mängd UV-ljus skall produceras krävs en tillräckligt mörk omgivning. Provningsområdet måste därför avskärmas. UV-lampornas ljusstyrka är känslig för åldring, nätspänning och nedsmutsning. Underhåll och kontroll lamporna är därför av största betydelse. Undersökning av spänningskorrosionssprickor är ett exempel där fluorescerande magnetpulverprovning har betydligt större känslighet än konventionell magnetpulverprovning.

#### Utförande och utvärdering

Provområdet skall vara rengjort från alla lösa föroreningar såsom till exempel glödska, rost och fett. Föroreningar orsakar falska felindikationer utöver risken för att bärarvätskan blir otjänlig. Högtemperaturkomponenter är vanligen mer eller mindre oxiderade. Avlägsnande av oxidskikt och putsning så att provningen utförs på en metallren yta utan slipspår är i regel nödvändigt för att nå acceptabel kvalitet av provningen. Hos målade komponenter måste färgen avlägsnas. Rengöring av smutsiga och oljiga ytor är nödvändigt. Om det vid provning av svetsar finns svetsrågar kvar rekommenderas att slipa sådan jämna på samma sätt. Detta ökar avsevärt möjligheterna att upptäcka sprickor och undvika falska indikationer.

Om provningen ger indikationer kan metoden i sig inte avgöra vad för slags defekter som indikerats. En erfaren operatör kan emellertid på indikationens utseende ofta bedöma om det är en relativt grund eller djup spricka, om defekten ligger under ytan eller om det kan röra sig om en falsk indikation.

Med magnetpulvermetoden kan under goda förhållanden små defekter med en längd på omkring 1 mm upptäckas. Utvärderingar av detekteringsgränser vid fältprovning har visat att defekter mindre än 3 mm har höga sannolikheter att inte upptäckas (Kauppinen 1993). Då provningsförhållandena inte alltid är ideala kan det rekommenderas att bedöma detekteringsgränser från fall till fall och vad det har för konsekvenser vid livslängdsanalys av komponenten.

Figur 1.6-2 visar krypsprickor vid en svets mellan ett högtrycksångrör och ett ventilhus, detekterade med MT.



**Figur 1.6-2. Krypsprickor detekterade med MT**

**Figure 1.6-2. Creep cracks detected by MT.**

Det finns normer och standarder för magnetpulverprovning, till exempel:

- ASME V, Article 7, Magnetic Particle Examination.
- ASME V, Article 25, Magnetic Particle Standards.
- ASME VIII, Div 1, subsect B, App 6, Methods for MT examination.
- ASTM E1444/E1444M
- SS-EN 1290 Oförstörande provning av svetsar - Magnetpulverprovning av svetsar
- SS-EN 1291 Oförstörande provning av svetsar - Magnetpulverprovning av svetsar - Nivåer för godkännande

Exempel på referenser för fördjupade kunskaper:

- McMaster, R. C., Non-destructive Testing Handbook, Vol II, (ASNT).
- Magnetic Particle Testing, General Dynamics Ct-6-3.
- Betz, C. E., Principles of Magnetic Particle Testing Magnaflux Corp.
- Referenser i text:

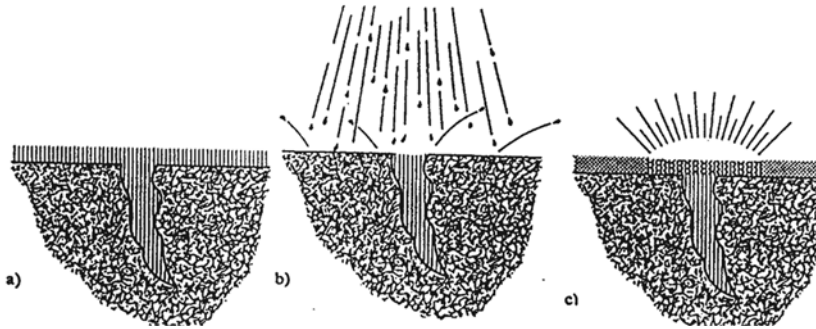
EPRI-CS 3675. 1984.

Kauppinen P. & Sillanpää J. Reliability of surface inspection techniques, Int. J. Pres. Ves. & Piping 54, 1993 pp, 523-533.

### 1.6.2 Penetrantprovning

Penetrantprovning (PT) används för att detektera ytliga fel och kan användas på de flesta material såsom, metaller plaster och glas. Metoden är inte lämplig för material som är porösa eller absorberande. Penetrantprovning utvecklades på 1940-talet för att

fylla tomrummen av magnetpulverprovning som bara kan utföras på magnetiska material och röntgenprovning där ytfel inte kan hittas. PT är sedan dess en av de vanligaste metoderna för oförstörande provning och har vidareutvecklats för många olika tillämpningar. Provningsen består av tre huvudmoment vilka illustreras i Figur 1.6-3.



**Figur 1.6-3. Huvudmoment vid provning med penetrant.**  
 a) Penetranten söker sig ned i sprickan.  
 b) Överskottet av penetrant spolats bort.  
 c) Framkallare appliceras, suger upp och färgas av penetranten.

**Figure 1.6-3. Principal actions of liquid penetrant testing.**  
 a) The penetrant is flowing in to the crack.  
 b) The residual of penetrant is removed.  
 c) An applied developer draws up and becomes coloured by the penetrant.

Kapillärkrafter styr både penetrantens förmåga att tränga ned i sprickor och effekten av framkallningen. Det är samma kraft som får till exempel saven att stiga i träd och dess storlek bestäms av faktorer som penetrantens ytspänning, vätförmåga och viskositet samt på hur kapillären (felet) ser ut. Man bör därför vara uppmärksam på att detekteringsförmågan kraftigt kan försämrats om penetranten är avsedd för andra typer av fel än de man letar efter.

Krav på egenskaper man kan ställa på en penetrant är att:

- Kunna tränga in i mycket tunna sprickor.
- Stanna kvar i relativt stora öppningar.
- Inte dunsta eller torka för snabbt.
- Vara lätt avsköljbar.
- Motstå ursköljning av felen.
- Framkallas på kort tid.
- Bilda en tunn film från felet utan att flyta ut i framkallaren och samtidigt ge en stor kontrastverkan mot omgivningen.
- Ha stor briljans eller fluorescens även i mycket små mängder.
- Inte ge störande bakgrund vid bedömning av eventuella indikationer.
- Inte skada material som provas. Exempelvis finns restriktioner för innehåll av klor, fluor och svavel i penetranter som skall provas på rostfritt stål, nickelbaslegering och titan.



För att uppnå dessa krav finns en mängd olika penetranter, avpassade för olika användningsområden. De kan delas upp i två huvudgrupper, färgade (röda) och fluorescerande. Fluorescerande färgämnen har mycket högre kontrast än röda och sådan typ av provning ger därför i allmänhet en avsevärt bättre känslighet. Penetranterna delas in i olika känslighetsklasser från lågkänsliga till ultrahögkänsliga. Klassindelningen kan återfinnas i normer och kan variera mellan olika sådana. Båda huvudtyperna kan sedan vara vattenavskiljbara, efteremulgerbara eller lösningsmedelsborttagbara.

Vattenborttagbar penetrant är den vanligaste formen av provning. I fält krävs sköljning med en luft/vattenpistol. Emulgerbara metoder är oftast inte avpassade för fältprovning. Borttagning med trasor med tillfört lösningsmedel är, på grund av sin smidighet, den dominerande metoden i fält. Känsligheten är dessutom högre än för vatten- och emulgeringsmetoder. Korrekt torkning innan framkallning är ett mellansteg som för vissa metoder kan vara tidskrävande. Penetranter tål temperaturer upp till 50°C. Högre temperaturer skall därför undvikas vid torkning och på provföremål. I höguttemperaturanläggningar är det väsentligt att planera PT så att varma komponenter hinner bli avsvalnade. PT skall heller inte utföras vid temperaturer under 15°C då det finns risk för att kondens bildas som täpper till defekter.

Även bland framkallare finns flera olika typer. De grupperas i våtframkallare och torrframkallare. Torrframkallare används uteslutande till fluorescerande penetranter. De kan vara omständiga att arbeta med. Tillsammans med krav på mörkläggning och ultraviolett ljus är därför fluorescerande PT inte ett självklart val vid fältprovning. Smidighet och snabbhet är ju annars en av penetrantprovningens större förtjänster.

Några viktiga regler som gäller för PT är att:

- En provad yta måste avsynas minst 7 och högst 30 minuter efter det att framkallaren applicerats.
- Omprovning inte alltid är pålitligt. Det är förbjudet att först prova med färgad PT och därefter göra omprovning med en fluorescerande (den röda färgen maskerar fluorescensen).
- Grova ytor kan försvåra detekteringen av fel och är svåra att få rena från bakgrundspenetrant. Omsorgsfull slipning av grova och korroderade/oxiderade ytor rekommenderas.

I höguttemperaturanläggningar har (PT) sitt självklara användningsområde på material som inte är magnetiska. För magnetiska material är generellt magnetpulver provning (MT) att föredra då detekterbarheten i allmänhet anses vara något bättre (minsta detekterbara sprickbredden är 3-4 och 6-7 µm för MT respektive PT). Det kan dock finnas vissa applikationer som endast är åtkomliga med PT, till exempel på insidan av ånglådor som är mindre än att man kan krypa in i dem. Utmattnings och spänningskorrosionssprickor uppstår inte sällan från insidan av sådana ånglådor och det är då möjligt (men inte lätt) att applicera penetranten genom till exempel en avlägsnad tub och avsyna med hjälp av speglar. Ytterligare en försvårande faktor är här att oxidskikt som kan dölja sprickorna först måste avlägsnas.

Oxidbildning på komponenter utgör en av de största begränsningarna för användning av PT i höguttemperaturanläggningar. Tunnare sprickor är ofta oxidfyllda, vilket innebär att de inte framträder vid provningen. Med högre temperaturer, långsammare spricktillväxt och mer oxidationsbenäget material ökar risken för att sprickan skall vara oxidfylld. Om någon lämplig tillväxtlag av oxider för aktuellt material och aktuella

drifttemperaturer står till buds skulle man kunna bilda sig en uppfattning om hur breda sprickor man riskerar att missa med PT. Krypsprickor, återvärmningssprickor och i många fall termiska utmattningssprickor (se [avsnitt 1.5](#)) bildas, i olegerade och låglegerade stål, typiskt vid temperaturer där oxidationen är kraftig. Martensitiska 9-12 % Cr stål är betydligt mindre oxidationsbenägna vid sådana temperaturer, åtminstone vad gäller krypsprickor och termiska utmattningssprickor. Höglegerade högtemperaturstål och nickelbaslegeringar är ännu mindre oxidationsbenägna men kan å andra sidan ha applikationer vid väsentligt högre temperaturer än de andra materialen.

#### Olika typer av indikationer

Indikationer vid PT blir större och ofta mycket större än den defekt som indikerats. Det är emellertid alltid indikationens storlek som ska anges vid rapportering. Följande begrepp används:

- En relevant indikation beror alltid på ett riktigt fel.
- En icke relevant indikation beror på komponentens konstruktion och beskaffenhet till exempel spalter och spår.
- En falsk indikation har orsakats av provningsförfarandet, till exempel kladd och rester.
- Linjära och runda indikationer definieras med att längden är mer än respektive mindre än eller lika med tre gånger bredden.
- Rapporteringsnivå är den storlek över vilken indikationer ska rapporteras.
- Acceptansnivå är den storlek på indikationen över vilken man underkänner objektet.

Figur 1.6-4 ger exempel på relevanta indikationer. Figur 1.6-5 visar indikationer påvisade med PT vid en svets i en rörledning av höglegerat stål.

| Beskrivning                             | Utseende                                                                            | Orsak                               |
|-----------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|
| Kontinuerliga linjer                    |  | Spricka, kallflytning, övervalsning |
| Avbrutna "streckade" linjer             |  | Samma som nr 1                      |
| "Punktformade" eller runda indikationer |  | Porositet, Djupa sprickor           |
| Punktformade indikationer               |  | Fina porer                          |

Figur 1.6-4. Exempel på PT indikationer.

Figure 1.6-4. Examples of PT indications.



**Figur 1.6-5. Små indikationer vid svets, påvisade med PT.**

**Figure 1.6-5. Small indications detected by PT at a weld.**

Exempel på normer för PT:

- SS-EN 571-1 Penetrantprovning, Del 1 – Allmänna principer
- ASME V, Article 6, Liquid penetrant testing.
- ASME V, Article 24, Liquid penetrant testing standards.
- ASME VIII, Div, subsect B, app 8, PT examination.

### 1.6.3 Ultraljudprovning

Med ultraljudprovning (UT) kan inre och yttre diskontinuiteter avslöjas samt djup och storleksbestämmas. Dessutom kan godstjocklekar mätas. Metoden kan tillämpas inom vida områden och har stor användning. Detta gäller även för tillståndsundersökningar i högttemperaturanläggningar. Speciella tillämpningar kan då rekommenderas beroende på komponentens utseende. Detta kommenteras närmare i handbokens del om mekaniska komponenter. Ljudet frambringas av sökare som läggs an mot objektet. Det utsända ljudet reflekteras mot eventuella diskontinuiteter eller motstående sida av godset (botteneko). Principer för ultraljudprovning finns beskrivna i till exempel Värmeforskrappport 614.

### 1.6.3.1 Detektering av defekter

Då utsänt ljud reflekteras av en diskontinuitet i godset ges en indikation. Utöver defekter som till exempel sprickor, svetsfel och slaggstråk ger även geometriska förändringar som till exempel svetsrågar och rotvulster indikationer vilket inte alltid är att betrakta som defekter. Därför är begreppet diskontinuitet etablerat. Det är emellertid i många fall möjligt att i analysen skilja geometriska indikationer från defekter. Av sådant som i allmänhet är att betrakta som defekter kan indikationer av slaggstråk även vara möjliga att skilja från indikationer av sprickor och svetsfel. Det är vanligt att indikationen presenteras på en katodstråleskärm i form av lodräta avböjningar på en horisontell linje samtidigt som materialet genomljudas. Även digitala apparater har idag stor användning i stället för sådana med katodstråleskärm. Signaler kan utvärderas, behandlas och lagras med datoriserad hjälp.

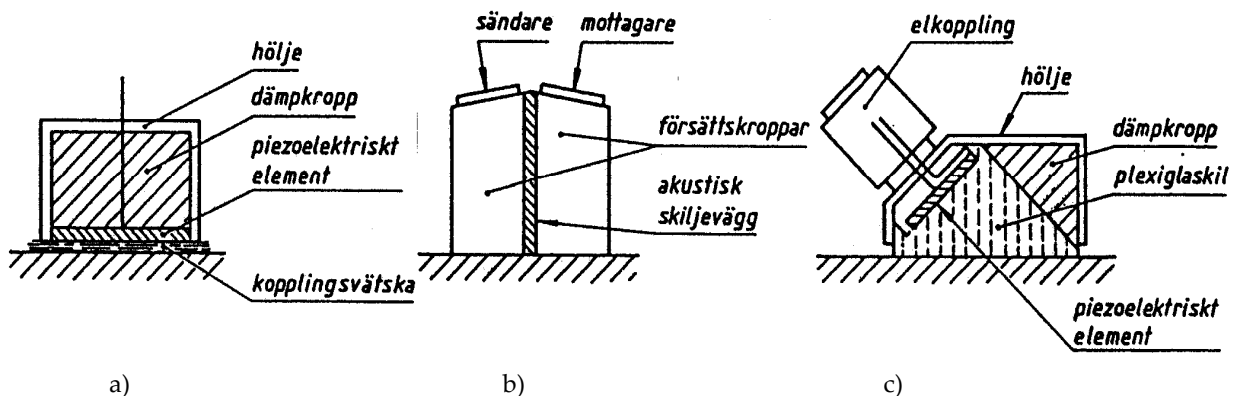
Vid ultraljudprovning är detekterbarheten helt beroende av ljudriktningen i förhållande till defektens utbredningsplan och defektens reflektionsyta. Defekten ska ha sitt utbredningsplan så nära 90° mot de utsända vågorna som möjligt. Plana defekter ger god reflektion medan tredimensionella reflekterar med större eller mindre spridning. I praktiken innebär detta att det i varje applikation är mycket viktigt att veta hur varje typ av spricka och defekt som kan finnas kan se ut och vilken provningsteknik som krävs för att kunna detektera den.

Material med grova korngränser och med en mikrostruktur där olika faser uppvisar stora skillnader i elastiska egenskaper ger upphov till att ljudvågen dämpas genom spridning. Detta försvårar upplösning av defektekon. Ljudvågen dämpas även av att ljudenergi omvandlas till värme - absorption. Mot dämpning kan större sändarstyrka och förstärkning eller provning med en lägre frekvens som ger lägre absorption användas. Grovkorniga material, svetsar av austenitiska stål och gjutjärn är exempel på svårprovade material på grund av sin dämpande förmåga.

En ultraljudutrustnings kapacitet kan karaktäriseras av

- i) skönjbarhet - förmåga att indikera ett litet fel på stort avstånd från sökaren,
- ii) upplösningsförmåga - förmåga att indikera och urskilja små fel tätt inpå varandra,
- iii) närupplösningsförmåga - förmåga att indikera och urskilja fel omedelbart under materialets yta. Det avstånd från sökaren där fel inte kan registreras kallas död zon.

En sökare innehåller en piezoelektrisk kristall som alstrar ultraljudsvågor. Olika typer av sökare kan användas: normalsökare där ljudvågorna lämnar sökaren vinkelrätt mot utgångsytan, tvåkristallsökare (kallas även SE-sökare) som består av en sändare och en mottagare samt vinkelsökare där ljudvågorna löper snett in mot gränssytan, bryts och fortsätter snett in i materialet med den vinkel som anges på sökaren. De olika typerna visas i Figur 1.6-4



Figur 1.6-4 Olika typer av sökare för ultraljudsprovning a) normalsökare b) tvåkristallsökare c) vinkelsökare.

Figure 1.6-4 Different types of probes for ultrasonic testing a) straight beam probe b) two-crystal probe c) angle probe.

För normalsökare gäller att förbättrad upplösningsförmåga sker på bekostnad av skönjbarheten. Sökare med olika kombinationer av skönjbarhet och upplösningsförmåga kan väljas.

Normalsökare eller tvåkristallsökare används vid detektering av till exempel gjutfel, valsfel, smidesfel och sprickor. Normalsökare är väl lämpade till att indikera klyvningar och slagginneslutningar samt för tjockleksmätning.

Ett flertal metoder med datoriserad ultraljudsprovning finns framtagna, till exempel P-Scan (Project Image Scanning). Sådana metoder förbättrar i första hand tillförlitlighet, precision och reproducerbarhet i jämförelse med manuell provning. Upplösningsförmågan kan i vissa fall förbättras medan skönjbarheten är oförändrad. En översikt av ett flertal metoder ges i Värmeforskrapport 587.

#### Provning av svetsar

För provning av svetsar används vinkelsökare. Tillgång till svetsritningar är nödvändigt för tillförlitlig provning. Kontroll av huruvida den verkliga svetsen överensstämmer med ritningen bör alltid utföras innan provning. Kalibrering av utrustningen skall alltid genomföras innan en specifik provning. Kalibrering av vinkelsökare omfattar bestämning av strålknippets divergens, vilket är en rätt besvärlig procedur. En sådan bestämning har dock stor betydelse vid storleksbestämningar. Riktlinjer för acceptansnivåer och hur svetsar skall provas anges i svensk standard SS-EN ISO 11666:2011 respektive SS-EN ISO 17640:2011.

Ultraljudsprovning lämpar sig väl för detektering av bindfel i svetsade rör men har begränsningar för andra typer av svetsdefekter. Radiografisk provning utgör ett vanligt komplement men denna metod har sina begränsningar vid godstjocklekar över 20 mm.

Sprickor som till exempel krypsprickor, termiska utmattningssprickor, spänningskorrosionssprickor och även andra korrosionsskador kan indikeras och kartläggas med ultraljudprovning. Metodik, möjligheter och begränsningar har utprovats i större eller mindre omfattning för olika applikationer och komponenter. Närmare beskrivningar återfinns i handbokens del 2 och i Värmeforskrappport 587. Vid godstjocklekar över 40 mm blir detekterbarheten av plana defekter som till exempel sprickor nedsatt i godsets centrum. Detta avhjälpas med sökning med tandemsökare. Ultraljudprovning blir även osäker vid godstjocklekar under 8 mm och är inte lämpad för godstjocklekar under 6 mm.

Vid all provning rekommenderas helt avvalnade komponenter. Vissa typer av sökare klarar provning upp till ca 70°C medan andra inte fungerar vid förhöjda temperaturer. Ljudhastigheten förändras med temperaturen. Konsekvenserna av detta bör alltid uppmärksammas vid eventuell provning vid förhöjd temperatur.

#### *1.6.3.2 Storleksbestämning av sprickor och defekter*

Vid bestämning av stora fel där indikationens utsträckning är större än ljudfältets utbredning används ofta den så kallade halvvärdesmetoden. Felstorleken definieras vid den position där ekohöjden avtagit till hälften av den i centrum av felet. Metoden betecknas ofta 6dB. Anledningen är att förstärkningen mäts i decibel (dB) och halv ekohöjd ger -6dB. Noggrannare bestämning erhålls av -20dB metoden (10 % av ekohöjden). Med dessa metoder är det emellertid stor risk att resultaten blir felaktiga om mätningarna utförs på sprickor som inte är plana

Den generella sökproceduren att utvärdera små fel där indikationens utsträckning är mindre än ljudfältets utbredning är att jämföra reflektionen med en artificiell reflektor, till exempel "flat bottom hole (FBH)". Alla indikationer lika eller större än en artificiell defekt med känd storlek och form som definierar den defektstorlek som bestämts kräva rapportering, protokollförs. Om arbete med provblock med artificiella fel är opraktiskt kan så kallade AVG-diagram (Abstand-Verstärkung-Grösse) utnyttjas. I analystekniken kan beteendet av fysiska egenskaper som reflektion, diffraktion, löptid och backscatter användas. Datoriserade metoder tillsammans med tillämpning av sådana egenskaper kan användas till storleksbestämning av defekter. Datorisering innebär inte mer precis storleksbestämning men har avgörande betydelse i fråga om att erhålla tillfredställande tillförlitlighet och reproducerbarhet.

Diffraktionsteknik har stor användning för storleksbestämning, "Time of Flight Diffraction" (TOFD) är den mest etablerade metoden. TOFD använder två sökare, en sändare och en mottagare. Sökarna måste kunna placeras på varsin sida av sprickan. Om ytterytan är krökt mellan sökarna försvårar detta provningen. Möjligheterna till provning kan begränsas av dessa villkor. Till exempel kan komponentens geometri begränsa de största sprickdjup av ytbrytande sprickor som är möjliga att bestämma.

Phased Array är en UT teknik där olika sökarvinklar kombineras i en och samma avsökning. Probens egenskaper förändras elektroniskt genom att tidsförskjutna signaler som sänds och tas emot från element i array proben.

Metoden är både tids- och kostnadseffektiv och ökar samtidigt sannolikheten att upptäcka defekter. Position och storlek på eventuella defekter kan tydligt presenteras i färgbilder eller i 3d.

En Phased Array sökare fungerar som en sökare som har delats upp i flera små element. Var och en för sig kan dessa element skicka och ta emot signaler. Genom att variera tiden för de pulserande elementen kan ljudpulsens riktning och fokus styras.

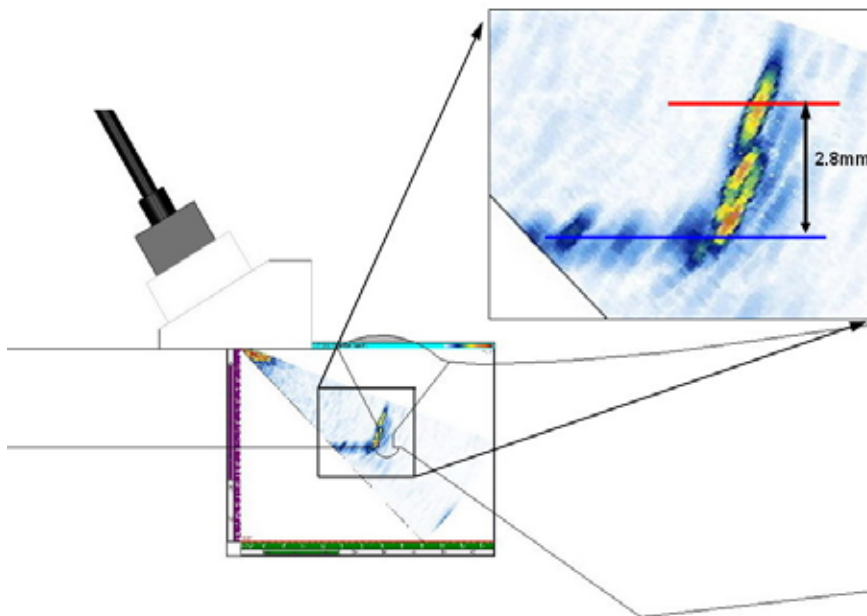
Phased Array UT ger både snabba och korrekta resultat på allt från små pannrör till massiva turbiner och kärl. All detektering och storleksbestämning som idag görs med konventionell UT-teknik kan också utföras med Phased Array UT.

Med phased array teknik kan även elektronisk skanning utföras. Då används samma avfyrnings-sekvens på en grupp aktiva element. Rörelsen sker längs med längden av phased array proben med samma vinkel och kan jämföras med den konventionell sökare som förs fram och tillbaka. Genom en svepande rörelse med flera olika vinklar kan hela sektorer skannas av.

### Fördelar med Phased Array UT

- Ger snabbare och mer effektiv provning.
- Data från provningen sparas och arkiveras, den kan utvärderas i efterhand och jämföras med tidigare provningar
- Grafiska färgbilder kan erhållas.
- Lättare att prova komplexa geometrier samt bättre upplösning och karakterisering av indikationer jämfört med konventionell UT.
- Kan automatiseras.

Figur 1.6-5 visar ett exempel på resultat av sektorskanning av ett rör med en längsgående svets.



**Figur 1.6-5** Sektorskanning med phased array av en svetsad komponent. Färgerna indikerar utbredningen av defekter vid svetsen är.

**Figure 1.6-5** Sector scanning with phases array at a welded component. The colours indicate the extension of defects.



### 1.6.3.3 Godstjockleksmätning

Vid godstjockleksmätning registreras bottenekot från det utsända ljudet vilket kan omsättas till ett mått på godstjockleken genom att ljudhastigheten är känd. Ljudhastigheten är konstant i ett givet material men varierar mellan olika material. Konventionell godstjockleksmätning kan karaktäriseras som en punktmätning. Vid mätning av objekt som kan ha stora lokala variationer i godstjocklek är det viktigt att mäta med ett tillräckligt antal punkter så att resultaten blir representativa. Stora objekt, t.ex. panelväggar i en eldstad, kan i fall av lokala variationer bli närmast omöjliga att kartlägga med avseende på godstjocklek.

I fält används ofta portabla godstjockleksmätare i fickformat. De fungerar enligt samma princip som en ultraljudapparat med en tvåkristallsökare och redovisar uppmätt godstjocklek på en display, typiskt med en noggrannhet på en tiondels millimeter. Resultat kan lagras i instrumenten. Standardinstrumentet har en inbyggd kalibreringsbit som gäller för olegerade och låglegerade stål inom ett visst tjockleksintervall. Andra tjockleksintervall och mätning på austenitiska rostfria stål kan ställas in. Mätning på andra tjockleksintervall samt austenitiska stål fordrar kalibrering med kompletterande kalibrerings bitar för bibehållen precision av resultaten. Mätning på tjocklekar och material med andra ljudhastigheter än de som de som instrumentet är avsett för, minskar precisionen. Signifikanta avvikelser kan innebära att resultaten blir oanvändbara.

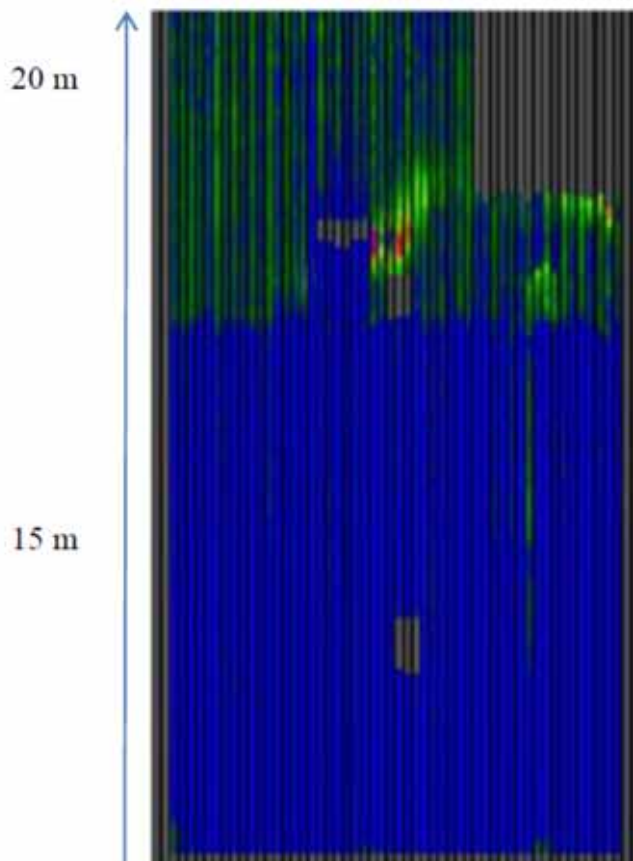
Provningen ställer krav på ytfinitet, planhet och temperatur på mätstället. Kapaciteten att klara mätning vid högre temperaturer än rumstemperatur varierar för olika instrument. Det finns speciella instrument som kan klara temperaturer upp till 600°C. Den piezoelektriska kristallen klarar högst ca 70°C vilket innebär att de speciella instrumentens sökare är utrustade med isoleringar och kan även ha restriktioner i form av kort mättid på ett fåtal sekunder och svalningstid mellan mätningar för att riktiga resultat skall erhållas. Dessutom måste korrigering för ljudhastighetens ändring med temperaturen göras. Det kan rekommenderas att planera provningen så att den utförs på helt avsvagnade komponenter om det endast finns tillgång till standardinstrument.

Med konventionella ultraljudapparater används normalsökare vid tjockleksmätning. En mätnoggrannhet på 1-2% kan uppnås. Detta kräver teknik där upprepade bottenekon används - multipelekon. Med multipelekon kan även gods med ytskikt som till exempel glödskalet och färg mätas utan att ytskiktets tjocklek ingår.

Under senare år har också en ultraljudsteknik där man använder sig av en så kallad elektromagnetisk akustisk sökare (EMAT) utvecklats och börjat användas. Med denna teknik kan man scanna över tuber och registrera godstjockleken snabbt och heltäckande. EMAT-tekniken genererar och tar emot ultraljudvågen med en elektromagnetisk akustisk växelverkan med det provade materialet. Sökaren står inte i direkt kontakt med materialet och det för med sig att det inte behövs lika omfattande rengöring av provobjektet som vid användning av piezoelektriska sökare.

Exempel där EMAT-baserad skanning har fått framgångsrik användning är på panelväggar i eldstaden samt överhettartuber. På eldstadstuber, som ofta har större diameter för att kunna täckas in i omkretsled med en sökare, kan tre sökare användas, vilket innebär att godstjockleken hos panelväggen kan kartläggas fullständigt. Figur 1.6-6 visar ett exempel på resultat av en skanning av en eldstadsvägg. Färgskalan kan ställas in så att t.ex. rött motsvarar att den minsta acceptabla godstjockleken har underskridits. För en noggrannare analys och noggrannare jämförelser med tidigare mätningar kan

också diskreta tjockleksvärden tas fram med mycket täta intervall (1 mm) från den skannade ytan. Skanning av tuber är med andra ord ett mycket kraftfullt hjälpmedel i jämförelse med konventionell tjockleksmätning i form av enstaka punktmätning längs mätlinjer av eldstadsväggar eller överhettare.



**Figur 1.6-6** Eldstadstuber i en panelvägg skannade med avseende på godstjocklek med hjälp av EMAT. Ju varmare färg desto tunnare är godset.

**Figure 1.6-6** Water walled tube scanning results of wall thicknesses by use of EMAT. Warmer colours indicate lower wall thicknesses.

#### 1.6.4 Virvelströmsprovning

Virvelströmsprovning har använts länge inom flygindustrin och har på senare år fått ökad användning inom kärnkraft och konventionell industri. Utvecklingen är snabb och många nya tillämpningar har etablerats. Metoden kallas även induktiv provning och dessutom förekommer engelskans Eddy Current Testing (ET) i dagligt tal. ET kan utföras på elektriskt ledande material och kan detektera sprickor på och strax under ytan.

Spricksökning är ett av de viktigaste användningsområdena för PT. Sprickor orsakar en störning i de inducerade strömmarna som normalt lätt kan upptäckas under förutsättning att en lämplig probe används. Utöver spricksökning kan även sprickdjup, skiktjocklek, strukturförändringar och hårdhetsvariationer kan mätas.

En utrustning består av tre huvudbeståndsdelar:

- Generator
- Testspole
- Registreringsutrustning

Generatoren alstrar en växelström. Ett primärt magnetfält uppstår då strömmen passerar testspolen. Magnetfältet inducerar virvelströmmar i provföremålet. Virvelströmmarna alstrar i sin tur ett sekundärt magnetfält som spolen känner av. Storleken på detta magnetfält påverkas bland annat av förekomster av diskontinuiteter i provföremålet.

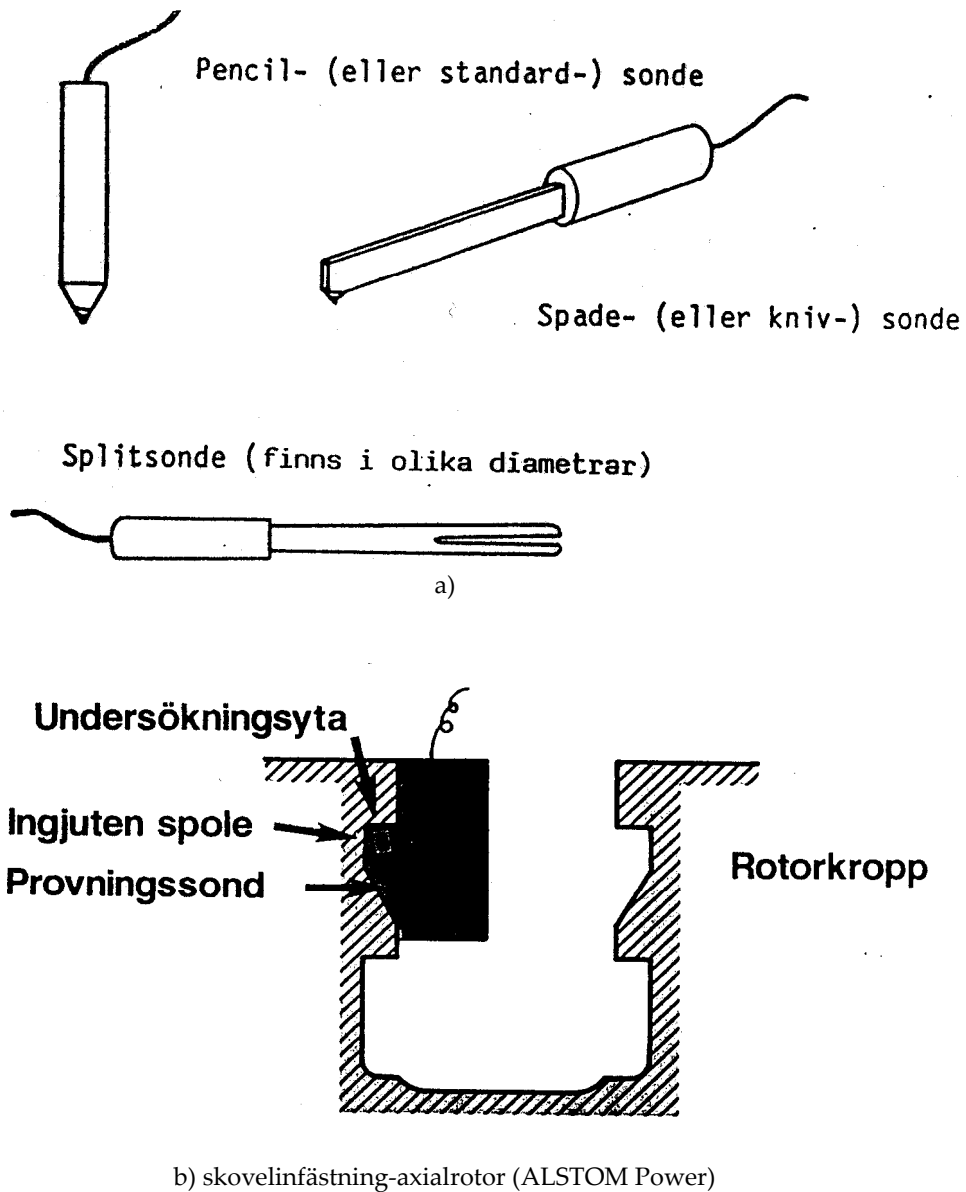
Det sekundära magnetfältet påverkas även av materialets konduktivitet. Konduktiviteten är i sin tur beroende av bland annat materialets värmebehandling, kornstorlek, hårdhet, kallbearbetning och temperatur. Materialets tillstånd och inverkan av sådana faktorer måste därför vara kända vid tolkningen av signaler från provningen.

Ett materials förmåga att skapa magnetiska kraftlinjer benämns permeabilitet. Vid provning av ferromagnetiska material uppstår en variation av permeabiliteten i objektet med risk att dessa variationer maskerar signaler från diskontinuiteter. En lösning till sådana problem är att mättnadsmagnetisera materialet.

Virvelströmsprovning är generellt mest känslig för variationer i testobjektet närmast spolen, den så kallade skin-effekten. Skin-effekten blir mer påtaglig vid ökning av i) provningsfrekvens, ii) konduktivitet och iii) permeabilitet.

Induktiva ytgivare har många applikationer vid fältundersökningar. Invändiga sonder används för provning av monterade rör. Ytgivarna delas in i högfrekventa givare som är mycket känsliga för ytsprickor och korrosion samt lågfrekventa som används när man vill upptäcka sprickor och korrosion under ytan. Det finns ett många olika utförande av givare. Olika utföranden kan passa olika bra till, och väljs beroende på, objektets geometri. Ofta utformas en givare speciellt för ett givet objekt. Figur 1.6-7 visar några exempel.

Skillnader i objektets geometri och dimension påverkar virvelströmsfältet när givaren passerar. Sprickor är ofta belägna vid sådana positioner vilket försvårar tolkningen av signaler. Det finns metoder för att särskilja geometriska effekter från defekter vilket måste behärskas av operatören. Manuellt hanterade givare ställer överlag stora krav på operatören. Vinkel mellan objekt och givare, tryck av givare mot objekt och tillfälliga lyftningar av givaren (till exempel som effekt av provning på en skrovlig yta) påverkar kraftig signalerna. Felaktig hantering kan ge helt felaktiga mätresultat. Utbildnings- och certifieringsverksamhet av operatörer finns inom till exempel ASNT och Nordtest. För provningen krävs även referensstandard. Provningen är standardiserad i svensk standard SS-EN ISO 10893-2:2011.



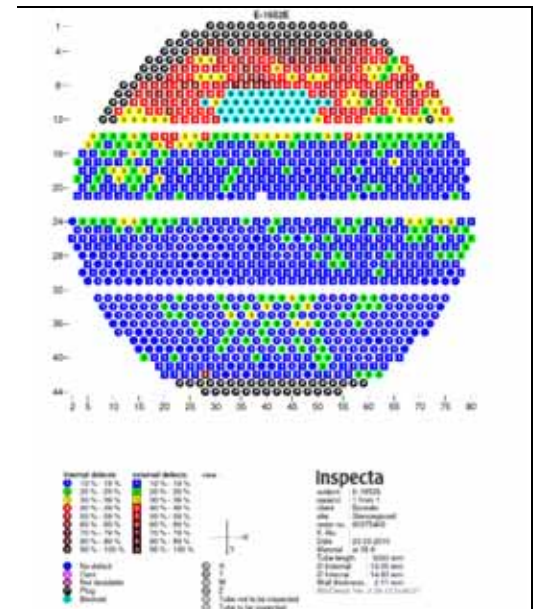
**Figur 1.6-7** Exempel på induktiva ytgivare: a) standardutförande b) speciell anpassning till objektet.  
**Figure 1.6-7** Examples of inductive surface transducers: a) standard b) special design for the object.

Andra parametrar som påverkar provningen är till exempel slitage och temperatur. Temperaturstabiliteten måste vara god. Provning kan utföras vid förhöjda temperaturer, med konventionella spolar av koppartråd upp till 200°C. Vid högre temperaturer rekommenderas silvertråd med keramisk isolering.

Registreringsutrustningen kan bestå av en analog visare eller, vanligen, ett oscilloskop. Möjligheter och begränsningar till att detektera sprickor och andra defekter uppblandat med utslag av till exempel svetsstrukturer där både kornstorlekar och hårdheter vanligen varierar kräver utstudering. I fallet av krypskador, som ofta uppträder i svetsar, har ET potential att detektera mikrosprickor som är betydligt mindre än vad som kan upptäckas med MT. Metoder för detta finns emellertid inte ännu etablerade.

Exempel på tillämpningar av ET på mekaniska komponenter  
högtemperaturanläggningar är kontroll av skovelinfästningar och framkanten på  
slutstegsskovlar i LT-rotorer till kraftverksturbiner, infästningar av tubplattor i  
värmeväxlare samt screening av godstjocklek genom skanning av tuber i värmeväxlare  
och panelväggar.

ET lämpar sig till att registrera skarpa skillnader i godstjocklek. I fall där gropfrätning (pitting) är styrande för tubernas livslängd är därför ET en framstående metod. Gradvisa förändringar av godstjockleken kan inte fångas upp exakt. Resultatet blir istället en ungefärligt, dvs. en screening av godstjockleken. Figur 1.6-8 visar utrustning för kontroll av tuber i värmeväxlare, där skanning med ET är den ledande **provningssmetoden**.



**Figur 1.6-8** Utrustning för kontroll av godstjocklek hos tuber i värmväxlare till vänster och resultatredovisning till höger där olika färger motsvarar olika intervall av godstjockleksreduktion.

**Figure 1.6-8** Equipment for testing of wall thickness in heat exchanger tubes on the left hand side and presentation of test result on the right hand side where different colours correspond to different interval of wall thickness reduction.

Vad gäller screening av godstjocklek av tuber i panelväggar är det en metod som kallas SLOFEC (Saturation Low Frequency Eddy Current) som används. Ytterligare ett användningsområde för SLOFEC är mätning på heta objekt, t.ex. ångrör i drift. Figur 1.6-9 visar utrustning för skanning av vägtuber.



**Figur 1.6-8** Utrustning, bestående av en vagn med ET prob som ligger an mot vägguben med hjälp av en kraftig magnet, för screening skanning av godstjocklek hos tuber i panelväggar. Till höger dras vagnen upp längs hela tublängden i en eldstad.

**Figure 1.6-8** Equipment, consisting of an equipage with an ET probe that bear against the wall by a strong magnet, for testing of wall thickness in heat exchanger tubes on the left hand side and presentation of test result on the right hand side where different colours correspond to different interval of wall thickness reduction. On the right hand side the equipage is pulled along an entire tube in the water wall.

#### 1.6.5 Skiktjockleksmätning

Skiktjockleksmätning innebär att tjockleken av ett in eller utvändigt skikt där sammansättningen är en annan än godset i övrigt, mäts. Tre principer har användning för den här typen av mätningar:

- i) elektromagnetisk induktion
- ii) virvelström
- iii) ultraljud

För alla tre principerna appliceras en sond på objektets yta. Ytans kurvning och finhet inverkar på mätningarna. Med virvelström och elektromagnetisk induktion mäts skikt närmast proben medan ultraljud används till att mäta skikt på motsatta sidan av godset. Med elektromagnetisk induktion kan metallskikt som inte är ferromagnetiska och icke metalliska skikt som till exempel oxidskikt, plastbeläggningar och färgtjocklek mätas. Principen fordrar dock, som principen antyder att det underliggande materialet är magnetiskt. En oscillator producerar en låg växelspanning som ger energi till en spole i en flerspölig sond. Detta inducerar i sin tur en spänning till spolen närmast den första. Storleken på denna spänning beror på avståndet mellan sonden och det underliggande ferromagnetiska materialet och representerar således skiktjockleken.

Med virvelströmsprincipen kan man mäta samma typer av skikt som för elektromagnetisk induktion. Virvelström lämpar sig bäst för underliggande material som inte är ferromagnetiska, **se avsnitt 1.6.4**. Även här produceras en låg växelspanning från en oscillator till en spolförsedd sökare. Denna spänning inducerar



virvelströmmar i konduktiva material som motverkar det ursprungliga spänningsfältet och reducerar spänningen i spolen. Denna skillnad i spänning beror på avståndet från sonden till det underliggande materialet och kan representera skiktjockleken.

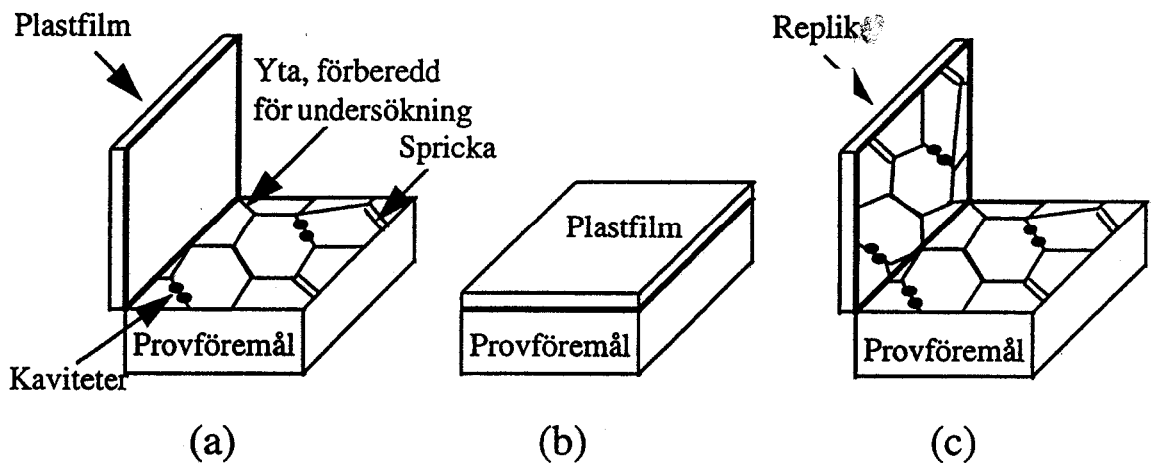
För skiktjockleksmätning finns bärbara instrument som med hjälp av olika, bytbara sonder använder både elektromagnetisk induktion och virvelström. Många typer av ytskikt kan därför mätas på både magnetiska och omagnetiska material. Ferromagnetiska ytskikt kan i princip inte mätas. Sådana här apparater har typiskt kapacitet att mäta skiktjocklekar från 5 µm till 25 mm. Skikt- och godstjocklek påverkar mätningarna och apparaten är därför inställbar för olika mätområden. Kalibreringar måste utföras med hänsyn till detta. Detta kan utföras antingen med ett obelagt prov och lösa kalibreringsskikt eller med belagda kalibreringsbitar med kända tjocklekar.

Ultraljudsmetoder har utvecklats för att mäta oxidskiktjocklekar på insidan av panntuber. Med hjälp av lagar för oxidtillväxten, som är tid och temperaturberoende, kan sedan metalltemperaturer och inverkan på kryplivslängd bedömas. Överhettningar kan identifieras och även accelererad oxidbildning som kan uppstå vid alkalisk vattenkemi och som leder till försämrat utbyte, kan spåras. Metoden har haft stor användning särskilt i USA under de senaste tio åren. Viktiga faktum som kan innebära osäkra bedömningar vid sådana här undersökningar är att oxidskikt ofta lossnar vid tvättning av tuberna och att de också kan vara benägna att lossna i drift.

#### 1.6.6 Replikprovning

Replikprovning innebär att avtryck tas på ytterytan av ett provföremål för att kunna studeras i ett mikroskop. Om ytterytan är metallografiskt preparerad och etsad så att mikrostrukturen träder fram, kan mycket information om materialets tillstånd erhållas och sprickor kan undersökas i detalj. Avtrycket utförs vanligtvis med en plastfilm, till exempel av etylacetat, som med ett lösningsmedel upplöst yta fästs på det preparerade området. När filmen torkat avlägsnas den ett avtryck av mikrostrukturen har erhållits, se Figur 1.6-8. Alternativt kan en tvåkomponents hårdplast sprutas på provområdet och avlägsnas när den har härdat.



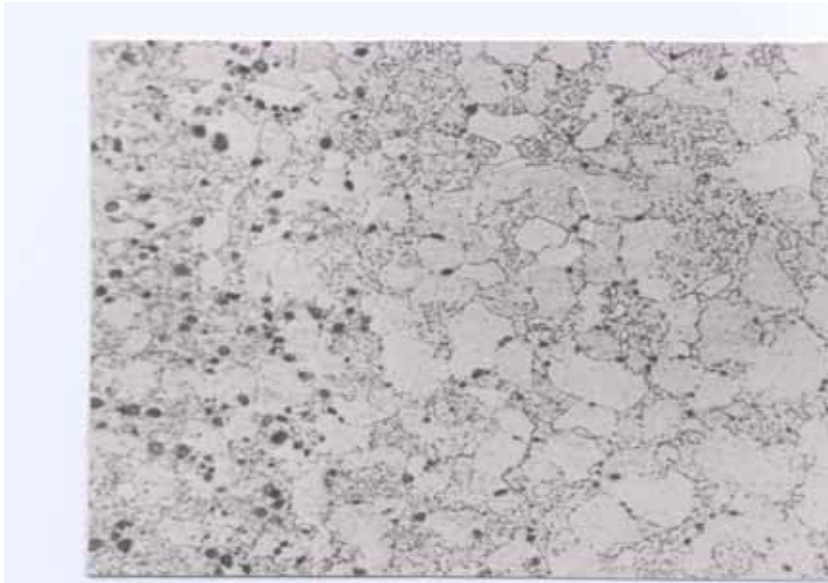


Figur 1.6-8. Schematisk bild av replikframtagning: a) beredning av ytan, b) en uppmjukad film pålagd på ytan och c) replik med negativ mikrostruktur.

Figure 1.6-8. Schematic illustration of replication: a) surface preparation, b) a softened film adapted to the surface and c) replica with negative microstructure.

De områden som provprepareras är relativt små och replikprovning utförs av praktiska skäl vid lokala positioner. Det är därför inte en metod för att söka efter sprickor eller andra diskontinuiteter. Vid många tillämpningar skall replikprovningen därför föregås av till exempel magnetpulverprovning, MT. Med replikteknik kan diskontinuiteter som detekteras med MT studeras i detalj i mikroskop.

Ett av de största tillämpningsområdena för replikprovning är att undersöka och kartlägga eventuell utveckling av krypskador, framför allt hos ångledningssystem. I mikrostrukturen framträder förstadiet till krypsprickor i form av kaviteter i korngränser vilka kan studeras i mikroskop vid högre förstoringar. Kaviteterna utvecklas i antal och sammanlänkas till stråk. Stråken separeras sedan till mikrosprickor och vidare till makrosprickor. Figur 1.6-9 visar exempel på kaviteitsbildning i mikrostrukturen. Krypskadorna klassificeras och det finns flera publicerade varianter av skadeskalor. Skadeskalorna och definitionerna av olika skadeklasser är i olika grad detaljerade. I Norden är klassificeringar som utarbetats inom Nordtest de mest etablerade (NT TR 170 (1992) och NT TR 302 (1995)). Den senaste versionen harmoniserar med den klassificering som har störst användning i Tyskland, VGB TW 507. Nordtest och VGB är de enda organ som publicerat riktlinjer för skadeklassindelning i Europa. Andra metoder för att utvärdera krypskador är att använda sig av skadeparametrar, vilket har utbredning främst i Japan och i de anglosaxiska länderna.



**Figur 1.6-9.** Mikrostruktur av ett driftpåkänt låglegerat stål. Kryp-kaviteter framträder i korngränserna. Replik tagen på en komponent av en ångledning efter cirka 100 000 timmars drifttid vid 530°C. Förstoring: 400 x.

**Figure 1.6-9.** Microstructure of a service exposed low alloy steel. Creep cavities are present in the grain boundaries. Replica taken from a steam pipe component after approximately 100 000 hours operation at 530°C. Magnification: 400 x.

Med kunskap och erfarenhet kan bedömningar göras om en komponents tillstånd. Skador som utvecklats till sprickor innebär omgående åtgärder som till exempel brottmekaniska analyser och reparationer. Vid kavitetsbildning och bildning av mikrosprickor rekommenderas typiskt en driftperiod till en återinspektion som beror på skadans omfattning. Sådana tidsperioder kan variera från flera år till mindre än ett år. Utöver driftdata och eventuella systempåkänningar kan material och typ av komponent ha väsentlig betydelse för vilken tidsperiod som är lämplig att rekommendera.

Riktiga utvärderingar från replikprover kräver en hög kvalitetsnivå på provtagningen, vilket omfattar omsorgsfull slipning, polering och etsning. Riktlinjer finns utfärdade i Nordtest NDT 010 (Nordtest 1991), Värmeforskrappport 627 (Wu 1998) och Värmeforskrappport 706 (Storesund 2000). Där ges även principer för provpositioner på svetsar och i Värmeforskrappporterna även för rörböjar. Tyska rekommendationer för provpositioner, med fler exempel på olika komponenter, står att finna i VGB-R 509 L (VGB-R 509 L 1984).

Replikprovning måste omfatta de kritiska komponenterna i en anläggning. Genom en spänningsanalys av ångledningssystemet kan de med avseende på systemspänningar högst påkända komponenterna identifieras. Innan spänningsanalysen måste upphängningar och stöd till ångledningarna inspekteras. Eventuella avvikelser får ritningsunderlaget måste beaktas vid analysen. Det krävs även kunskap och kompetens för att ta repliker på de rätta ställena på en komponent. Vid provning av svetsar är det särskilt viktigt att studera den värmepåverkade zonen. Figur 1.6-10 visar en stutssvets på en ångledning som har provpreparerats. Det är de små runda områdena som är polerade och etsade så att ett avtryck med en replik kan visa materialets mikrostruktur.



**Figur 1.6-10. Metallografisk provpreparering för replikprovning av en stutsvets.**

**Figure 1.6-10. Metallographic preparation for replica testing of a branch weld.**

Replikprovning bör utföras på helt avsvalnade komponenter. Temperaturer inom 5-30°C rekommenderas för att inte äventyra kvaliteten på provningen. Redan vid 40° börjar de plastmaterial som brukar användas att bli obrukbara. Det finns emellertid andra material för repliker, till exempel hårdplaster, som kan klara temperaturer upp till ca 80°C.

Utöver bedömningar av krypskadeutveckling har replikmetoden flera andra användningsområden som till exempel:

- i) fastställande av skademekanismer genom att studera sprickor och defekter
- ii) indikationer på överhettningar
- iii) kontroll av mikrostrukturer i svetsar
- iv) kontroll av mikrostrukturen med avseende på materialets tillstånd, materialets kvalitet, kornstorlekar etc.
- v) referensprov på mikrostrukturen av nyinstallationer vid kritiska positioner
- vi) töjningsmätningar

Vid all replikprovning skall det ej förglömmas att det är ytterytan som studeras. Bedömningar av provföremålets tillstånd inuti godset måste göras med rätt mått av försiktighet vilket är beroende av de kunskaper och erfarenheter som finns att tillgå för det aktuella fallet.

**REFERENSER**

Nordtest Method NT NDT 010. 1991.

ASTM E1351-01 (2012)

Storesund J. 2000. Rekommendationer för replikprovning av högtemperaturkomponenter i kraftanläggningar. Värmeforskrapport 706.

Wu R., Storesund J. & Sandström R. 1998. Framtagning av repliker för utvärdering av mikrostrukturen i högtemperaturkomponenter, nödvändiga kvalifikationer för operatören. Värmeforskrapport 627.

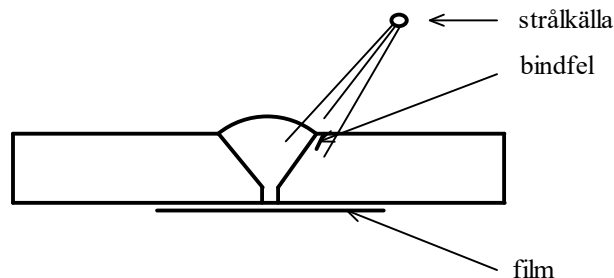
### 1.6.7 Radiografisk provning

Svetsprovning är ett av de viktigaste användningsområdena för radiografisk provning (RT). Andra användningsområden är provning av gjutgods och genomlysning av komponenter. Röntgenprovning är en välkänd annan benämning för metoden. En källa med genomträngande strålning (röntgen- eller gammastrålning) placeras på ena sidan av objektet. Strålningen detekteras, vanligtvis på en fotografisk film, på andra sidan. Skillnader i intensitet av strålning som passerat objektet ger variationer i filmens svärtning. Defekter ger upphov till ändring till strålningens intensitet i grad av hur de utbreder sig i strålriktningen.

Metoden lämpar sig väl för detektering av volymetriska defekter som till exempel porer, slagg och rotfel. Känsligheten för sprickor och andra plana defekter är hög men upptäckt kan å andra sidan helt undgåas om de plana defekterna inte utbreder sig i strålningsriktningen redan vid små vinkelfel. Detta innebär att man måste veta hur sådana defekter orienterar sig och ha möjlighet att anpassa strålningens riktning efter detta. Figur 1.6-11 visar ett exempel hur strålkällan bör riktas för detektering av bindfel i en V-fog. Andra begränsningar för metoden är:

- sämre känslighet för ytligt belägna fel.
- defekter kan inte djupbestämmas.
- känsligheten avtar med ökning av strålningens spridning och objektets tjocklek.
- strålningsrisk.

En praktisk fördel är att provningen automatiskt blir dokumenterad på film.



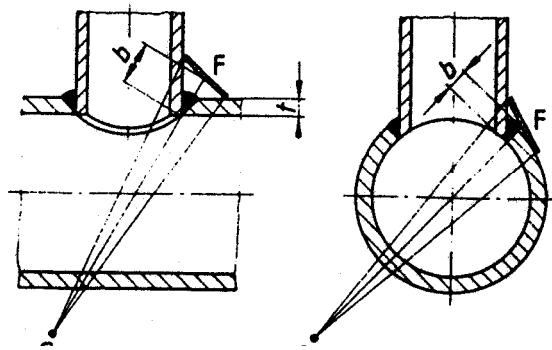
Figur 1.6-11. Strålningsriktning vid provning av bindfel.

Figure 1.6-11. Beam direction for discover of lack of fusion.

Radiografisk provning av kraftverkskomponenter tillämpas främst vid tillverkningskontroll av svetsar. Idealt skall film appliceras tätt intill in eller utsidan av svetsen och strålkällan på ett visst avstånd utanför den andra sidan. Detta kan bara göras så länge båda sidorna är åtkomliga. Det dock fullt möjligt att lägga röntgenfilm på utsidan av till exempel rör som bestrålas från motsatta utsidan, så kallad dubbelväggsgenomstrålning. Metodik finns standardiserad för både om bara den ena väggen skall undersökas eller båda väggarna skall undersökas samtidigt.

Figur 1.6-12 visar exempel på undersökning av väggen på filmsidan av en stutsinsvetsning. Bestämning av rätt avstånd mellan strålkälla (S i figuren) och provföremål utförs med nomogram. Detta avstånd beror på strålkällans storlek samt avståndet (b) mellan film (F) och provföremål. Det finns olika typer av strålkällor och val av strålkälla är bland annat beroende av godstjockleken (t). Generellt avtar känsligheten med ökande godstjocklek över 20 mm.

För kontroll av bild kvaliteten används så kallade bildkvalitetsindikatorer (IQI). Dubbelväggsgenomstrålning ger lägre känslighet än enväggsgenomstrålning. Krav på bildkvaliteten finns standardiserade för båda teknikerna. Tryckkärl och rörledningskomponenter kan ibland vara konstruerade med pluggar där film kan föras in vilket möjliggör RT med enväggsgenomstrålning vid en revision.



**Figur 1.6-12.** Stutsinsvetsning med dubbelväggsgenomstrålning där väggen närmast filmen (F) skall undersökas.

**Figure 1.6-12.** Branch weld, double-wall penetration, image of the wall next to the film (F).

De radiografiska metoderna delas in i två klasser:

- Klass A: grundläggande metoder.
- Klass B: förbättrade metoder.

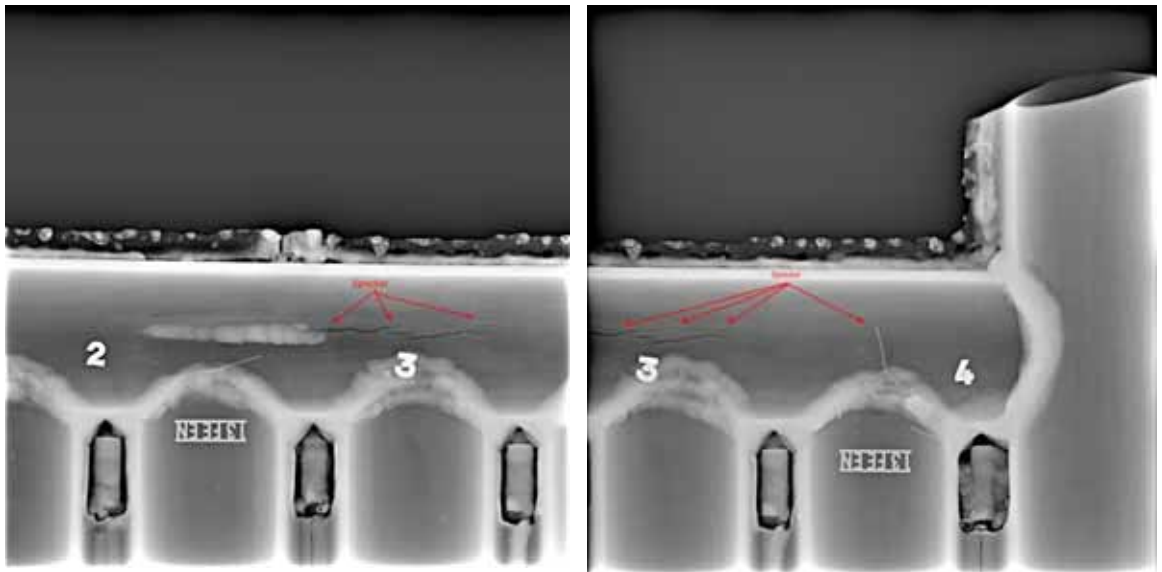
Det finns även krav på hur provningsplatsen ska vara avskärmd från skadlig strålning. En atlas för bedömning av röntgenfilm och klassificering av diskontinuiteter finns utgiven av International Institute of Welding och har väletablerad användning. En internationell accepterad defekterminologi finns i ISO-6520-1982.

Vid återkommande kontroller och besiktningar har RT varit mindre vanlig. Även om metoden kan ha begränsningar och ofta innebär att provningen måste göras nattetid för strålningens skull samt att röntgenrören är tunga att transportera så är RT på frammarsch för sådana undersökningar. En ökad insikt i att RT kan utgöra betydelsefulla och avgörande komplement till annan OFP som underlag till skadetålighetsanalyser och livslängdsbedömningar är en av de främsta anledningarna till detta.

### Digital röntgen

Under senare år har metoder för digital röntgen utvecklats. I stället för röntgenfilm används en ljuskänslig panel. Den kräver mindre strålningsintensitet än traditionella röntgenrör. Röntgen rör kan dock användas som strålkälla men för tunnare gods räcker det ett batteridrivet pulsröntgenrör och för tjocka gods kan en isotop användas.

Med digital röntgen är det ofta möjligt att prova i drift utan att isolering behöver kläs av, vilket naturligtvis innebär enorma fördelar. Figur 1.6-13 visar sprickor som har bildats och växer från insidan i en tubaväxling för en genomföring i en eldstadsvägg.



**Figur 1.6–13.** Töjningsinducerade korrosionssprickor på insidan av en avväxlingstub, indikerade med digital röntgen.

**Figure 1.6-13.** Strain induced corrosion cracks at the inside of a tube box indicated by digital radiography.

#### REFERENSER

EN ISO-6520-1:1998

McMaster, R. C., Non-Destructive Testing Handbook, Vol. III (ASNT)

SS-EN ISO 17636–1:2013

SS-EN ISO 17636–2:2013



### 1.6.8 Hårdhetsprovning

För hårdhetsprovning i fält används portabla utrustningar. Äldre utrustningar gör, på likadant sätt som stationära hårdhetsmätare (se **avsnitt 1.7.8**), ett statiskt intryck där hårdheten bestäms från optisk mätning av intrycket. Utrustningen är relativt massiv och att den måste fixeras på komponenten vid provningen. Detta är förknippat med stora begränsningar i hanterbarhet, åtkomlighet och möjlighet att mäta lokala hårdhetsskillnader, till exempel på ett svetsförband. En fördel är att resultaten i princip är direkt jämförbara med motsvarande stationär provning. Att de praktiska villkoren i fält inte inverkar till att provningen blir felaktig skall alltid uppmärksammas.

För behovet av snabbhet, åtkomlighet och möjlighet till att mäta mikrohårdheter (se avsnitt 1.7.8) finns sedan länge mer lätthanterliga utrustningar utvecklade. De kan bygga på andra principer än statiska intryck, till exempel uppmätning av energier från slag mot ytan med en fjäderkraft. Gemensamt för sådana utrustningar är att apparaten omvandlar information från intrycket eller inslaget till ett hårdhetsvärde. Den metod som registrerar denna information, det kan vara utgående från ultraljud eller elektriska spänningar som induceras av rekyl, avgör huruvida inverkan av elastiska och plastiska deformationer representeras i mätvärdet. Varje princip uppvisar sina skillnader från den konventionella provningsmetoden med statiskt intryck och optisk mätning, se vidare **avsnitt 1.7.8**. Därför finns metodik för nödvändiga korrigeringar utarbetade. Tillämpbarheten för sådana korrigeringar kan variera för olika material och materialtillstånd.

Eftersom varje typ av hårdhetsmätare presenterar en unik tolkning av hårdheten måste olika typer av jämförelser ske med urskilning. Jämförelser mellan olika material och omvandlingar till andra hårdhetsskalor kan ha varierande tillförlitlighet. Det är mycket viktigt att utrustningen används strängt under de villkor som instruktionerna anger och att rekommendationer följs så långt som möjligt. Detta har visats i ett Nordtestprojekt där olika fältutrustningars tillförlitlighet applicerat på högtemperaturmaterial har studerats (Borggreen 1999). Särskilt påpekas att inverkan av provobjektens storlek och geometri på mätresultaten kan vara stor.

Provning i fält kräver erfarenhet och att rutiner utarbetas för att:

- i) Minimera spridning i resultaten.
- ii) Kunna hantera eventuell spridning i resultaten från de mättekniska förutsättningarna i relation till faktiska hårdhetsvariationer på ett riktigt sätt.

Det är ofta relevant att prova hårdheten i svetsar där även den värmepåverkade zonen (HAZ) mäts. HAZ är en mycket smal zon och endast ett fåtal typer av fältutrustningar har kapacitet att ta upp hårdheten där på ett tillfredställande sätt. Syften med och tillämpning av hårdhetsprovning diskuteras närmare i **avsnitt 1.7.8**.

### REFERENSER

Borggreen et. al. 1999. Nordtest technical report 434, part 1-3.

### 1.6.9 Kemisk analys

Syften med kemiska analyser av en mekanisk komponent som går att utföra i fält kan vara att:

- i) Kontrollera om materialsammansättningen i en komponent motsvarar dess märkning.
- ii) Identifiera ett okänt material.
- iii) Identifiera eventuella förändringar från den specificerade sammansättningen som kan ha uppstått under till exempel svetsning, värmebehandling eller påverkan av miljö och temperatur i drift.

Portabel eller mobil utrustning finns att tillgå för att oförstörande ta kemiska analyser. Sådan provning kallas även positiv materialidentifiering, PMI, och de i allmänhet använda metoderna är röntgenfluorescens och optisk emissionsspektrografi. En prob anbringas på ytan av det material som ska analyseras och mätningen resulterar i en bulkanalys, det vill säga ett den genomsnittliga sammansättningen av det område som proben omsluter.

Med röntgenfluorescens kan provningen utföras med relativt billig och smidig utrustning. Precisionen är dock betydligt lägre och antalet grundämnen som är möjliga att analysera är färre än med optisk emissionsspektrografi. De fysikaliska begränsningarna för röntgen-fluorescens gör att denna metod normalt inte bör tillämpas på material med låga halter av legeringstillsatser som till exempel kolstål. Identifikation av föroreningar eller detaljerad information om till exempel förändringar i ett materials sammansättning i drift är i regel inte möjliga att genomföra annat än med mycket stora begränsningar.

Det finns ingen standard för arbete med PMI. Det är därför av särskild vikt att jämförande mätningar görs på relevanta provobjekt för att verifiera utrustningen och metodens användbarhet för provobjekt ifråga. Hänsyn och anpassning måste främst ske beroende på provobjektets geometri, ytutseende och materialtyp. Omsorgsfulla och i regel täta kalibreringar måste utföras. Utrustningens samt metodens reproducerbarhet måste kontrolleras. I många fall måste referenser till materialet liksom referenser till närliggande material finnas eller tas fram för att en kvalificering av provningen skall kunna göras.

Många PMI-apparater tar automatiskt fram den materialsort som det provade objektets resultat hamnar närmast.

### 1.6.10 Visuell kontroll

Besiktningar och inspektioner omfattar i regel alltid en visuell kontroll (VT) av anordningarna. Den visuella kontrollen utgör en av de allra viktigaste hörnstenarna till att avgöra till exempel var och hur oförstörande provning bör utföras, hur provningsbar en komponent är samt behovet av andra undersökningar. Den visuella kontrollen har till uppgift att uppmärksamma skador, förslitning och oegentligheter, som ögat kan uppfatta.

Sammantaget finns det ett i det närmaste otal saker som man bör vara uppmärksam på i en högttemperaturanläggning. Kännedom om konstruktion, material, drifhistoria och tidigare åtgärder i anläggningen samt erfarenheten av dessa är väsentliga inslag för att kunna göra relevanta insatser och bedömningar. Visuella kontroller bör utföras

systematiskt där tillvägagångssättet är välupprättad, väldokumenterad och ändamålsenlig med den anordning eller komponent som skall kontrolleras.

Visuell kontroll är inte sällan undervärderad, många fel kan upptäckas med ögat som är svåra att upptäcka med annan oförstörande provning, till exempel sprickor vid kanter och där åtkomligheten sätter gränser för andra metoders tillförlitlighet. Erosion och många typer av korrosionsskador undersöks i stor utsträckning med blotta ögat som enda hjälpmedel. Raffinerade metoder att öka detekterbarheten av sådana skador är dock under utveckling, exempel ges i Värmeforskrapport 587. Motiven kan vara att möjliggöra provning i större omfattning och på svårtillgängliga områden.

VT har svagheter i tillförlitlighet och repeterbarhet. Dels är utfallet mycket beroende av inspektörens erfarenhet. Uppmärksamhet och individuella uppfattningar om betydelsen av avvikelser är andra variabler som kan vara svåra att hantera. Dels kan det finnas typer av skador och förslitning förväntas att upptäckas men inte kan eller svårigen kan indikeras med VT. Ett exempel är lokala korrosionsskador som överskuggats av en lättare allmänkorrosion.

Till visuell kontroll hör även måttkontroll med olika typer av mätinstrument. Exempel i högtemperaturanläggningar är ovalitetsmätningar på rörböjar och omkretsmätning av rör för att registrera eventuella krypdeformationer. Stora skjutmått respektive måttband används typiskt för dessa ändamål. Ovalitet kan uppstå vid tillverkning och skapar stora spänningskoncentrationer vilket vid kryppåkänning innebär livslängdsreduktioner. Ovaliteten kan även öka under drift genom kryptöjning. Högsta tillåtna ovalitet är 4,5 % (enligt tyska normer). Precision fordras därför vid sådana mätningar. För att kunna uppnå detta med enklare mätverktyg som till exempel ett stort skjutmått måste ett omsorgsfullt tillvägagångssätt upprättas.

Vad gäller omkretsmätningar bör man vara uppmärksam på att resultaten kan tolkas på ett vilseledande sätt, även om mätningarna är noggrant utförda. Krypdeformationer kan vara mycket lokala. Dessutom är det inte ovanligt att komponentens krypduktilitet, det vill säga kryptöjningen vid brott, åtminstone lokalt är låg. Sprickor kan därför ha bildats även om en dimensionsmätning i närheten inte kunnat visa några eller mycket små deformationer. Med hjälp av små knoppar av oxidationsbeständigt material som referens, fastsvetsade vid kritiska positioner, kan dimensionsmätningar med hög noggrannhet utföras. Det finns även ett antal metoder för att lokalt mäta töjningar. Exempel är optiska metoder, med hjälp av kapacitiva töjningsgivare eller med påetsade töjningsmönster. Ingen av dessa är ännu fullt etablerade och flera har påtagliga begränsningar. En översikt av sådana metoder återges i Värmeforskrapport 587.

Även mätning av godstjocklek och skiktjocklek kan räknas som måttkontroller. Metoder för sådan provning redovisas i separata [avsnitt 1.6.3.3](#) respektive [1.6.5](#).

Svetsinspektion baseras på visuell kontroll och kan ibland vara den enda formen av kontroll som utförs på en svetsad konstruktion. Oftast kompletteras dock den visuella kontrollen med oförstörande provning och/eller funktionsprov. Vid svetsinspektioner används speciella mätdon och universalverktyg för mätning av till exempel fogvinklar, kantförskjutningar, smältdiken och råghöjd. Svetsinspektionen utförs av en svetsinspektör som utöver en visuell kontroll ofta har andra uppgifter som till exempel att i olika stadier i tillverkningen verifiera förutsättningarna för svetsarbetet och överensstämmelse med kvalitetssäkringsrutiner, specifikationer samt fastställda

kvalitetskrav. Det är därför väsentligt att svetsinspektören besitter en bred kunskapsbas.

Det har tidigare inte funnits någon formell utbildning för svetsinspektörer i Sverige. På TWI (The Welding Institute) finns sedan ett antal år ett utbildningsprogram som utbildar svetsinspektörer på tre nivåer. EWF (European Federation for Welding, Joining and cutting) har enats om ett gemensamt utbildningsprogram för svetsinspektörer i Europa där fyra olika utbildningsnivåer har definierats.

#### 1.6.11 Läcksökning, Tätkontroll och Tryckprovning

Till den här kategorin av provning finns metoder som inte bara kan användas till en av de rubricerade typerna. Skillnaden mellan de olika typerna kan beskrivas enligt följande:

*Läcksökning* är att leta reda på *var* i en konstruktion ett läckage finns.

*Tätkontroll* innebär att mäta *hur stort* läckage en konstruktion har.

*Tryckprovning* ger upplysning om en konstruktion förändras när den sätts under tryck.

För ånganläggningar i drift är rutiner för god uppsikt på läckande ånga att rekommendera. Speciell läcksökning tillämpas annars huvudsakligen vid tillverkningskontroller.

Vattentester kan användas som läcksökningsmetod, till exempel i kondensorer, men känsligheten är låg. Prestanda kan höjas med att blanda in en radioaktiv lösning (isotoptest) eller ett fluorescerande ämne (fluorescenstest) i vattnet. Läckor detekteras då med absorberande papper på presumtiva ställen respektive belysning med UV-ljus. Ett exempel på en annan metod som har tillämpning för högttemperaturkomponenter är heliumtest där en masspektrometer kan mäta helium som spargas vilket objektet fylls med. Heliumtestet kan användas till både läcksökning och tätkontroll men har inte någon större utbredning.

Eftersom läckage generellt inte accepteras i högttemperaturanläggningar har tätkontroller liten användning. Ett exempel är erosion av ledskenor i turbinhus som kan leda till läckage. Sådant läckage kan vara tänkbart att acceptera under en period. Ett mått på läckagets storlek och eventuella utveckling kan då vara värdefull och skulle kunna mätas med till exempel heliumtestet.

Vattentestet har annars stor användning som tryckprovningssmetod. Med vatten kan riskerna för katastrofala konsekvenser av eventuella sprödbrott undvikas. Tryckprovning kan även utföras under vissa villkor utföras med gas (se AFS 1985:14). Utöver provning innan en anläggning tas i drift finns föreskrifter för då provtryckningar är aktuella, till exempel efter ombyggnad eller reparation av en anordning (se AFS 1994:39 kap 6). Provtryckningen utförs vid  $1.3 \times$  beräkningsvärdet för hållfastheten. Detta innebär relativt låga tryck i förhållande till den statiska hållfastheten om anordningen är dimensionerad mot kryphållfastheten (krypbrottgränsen).

I högttemperaturanläggningar kan åldrings och försprödningsfenomen inträffa, se [avsnitt 1.5.6](#). Dessutom kan defekter påträffas för vilka anordningens skadetålighet inte regelmässigt kan avgöras. Starka skäl till att utelämna avspänningsglödning vid svetsreparationer kan finnas. Om osäkerhet råder rekommenderas skadetålighetsanalys och materialprovning för att klargöra inverkan av ovan nämnda

faktorer och lämpligaste sätt att genomföra en eventuell tryckprovning efter långa drifttider.

#### 1.6.12 Kvalificering av oförstörande provningssystem

I standarden SS-EN ISO 9712:12 fastställs ett system för kvalificering och certifiering av personal som utför industriell oförstörande provning (OFP). Det system som beskrivs i denna internationella standard gäller etablerade OFP-metoder. Den kan även gälla andra OFP-metoder, eller nya tekniker inom en etablerad, under förutsättning att ett heltäckande certifieringssystem finns och att metoden eller tekniken omfattas av internationella eller nationella standarder, eller att man för certifieringsorganet på ett tillfredsställande sätt har visat att den nya OFP-metoden eller tekniken är effektiv.

Certifieringen omfattar kompetens inom en eller flera av följande metoder:

- a) akustisk emissionsprovning;
- b) virvelströmsprovning;
- c) infraröd termografisk provning;
- d) täthetsprovning (hydraulisk provning undantagen);
- e) magnetpulverprovning;
- f) penetrantprovning;
- g) radiografisk provning;
- h) provning med trådtöjningsgivare;
- i) ultraljudprovning;
- j) visuell kontroll (enbart syning utan hjälpmedel omfattas inte, syning som ett led vid användning av en annan OFP-metod omfattas heller inte).

Kvalificerat arbete med tillstånds- och livslängdsbedömningar förutsätter också att den oförstörande provning som görs är tillförlitlig.

Detta tillgodoses för provningsmetoderna UT, RT, ET, MT, PT och VT med metodutbildning och kompetensprovning. Det finns tre kompetensnivåer:

- Nivå 1 utför provning efter instruktion.
- Nivå 2 utför självständigt provning, kalibrering och utvärdering av resultat.
- Nivå 3 ansvarar för metoden tekniskt och administrativt.

Det finns flera certifieringssystem för oförstörande provningspersonal:

- SS-EN 473: 2008
- Nordtest Doc Gen 010
- SS-EN 473/Nordtest
- SS-EN ISO 9712/Nordtest
- ASNT SNT-TC-1A

Certifiering omfattar krav på utbildning, erfarenhet, syn och examinering. Terminologin inom olika certifieringar överensstämmer emellertid inte alltid med varandra. Det gör inte heller de krav som ställs på certifieringen och det är kund och/eller myndighet som bestämmer kraven. Detta innebär att man som kund måste vara vaksam och också förvissa sig om innehåll och omfång i en viss certifiering vid val av certifieringssystem. Organisationer som utbildar, certifierar och examinerar OFP

personal bör vara ackrediterade. Det innebär att organisationen i fråga gör kompetensprövning enligt europeiska och internationella standarder inför ett ackrediteringsorgan. Swedac (Styrelsen för ackreditering och teknisk kontroll) är av regeringen utsedd till att vara svenskt ackrediteringsorgan.

Andra oförstörande provningsmetoder saknar kvalificerings- och certifieringssystem men kan förväntas utvecklas för vissa. För replikmetoden finns ännu inget certifieringssystem i Sverige. I övriga Europa är det mycket få organisationer som certifierar provningspersonal för replikprovning.

## 1.7 FÖRSTÖRANDE PROVNING

I det här kapitlet beskrivs förstörande provningsmetoder för bestämning av mekaniska egenskaper, hållfasthet mot skador som typiskt uppstår i högtemperaturkomponenter, materialsammansättningar och mikrostrukturer. Vid användning av provningen är det väsentligt att vara medveten om vilka slutsatser som är möjliga att dra med ledning av resultaten. Detta innebär att det är nödvändigt att ha kännedom om i vilken grad de villkor som provningen utförs med överensstämmer med de påkänningar som komponenten utsätts för samt precisionen i undersökningarna. Beskrivningarna syftar till att ge en uppfattning om hur och under vilka villkor olika typer av provning utförs samt fingervisningar om hur resultaten används vid bedömningar av tillstånd och livslängd. I flera avsnitt ges hänvisningar till kapitel 1.5, som behandlar olika skademekanismer, för kompletterande information.

Positioner för materialuttag och provernas utformning är exempel på faktorer som inverkar på hur relevanta bedömningar man kan göra. Eftersom förstörande provning ofta innebär betydande ingrepp i komponenten är det väsentligt att den planeras omsorgsfullt så att man kan få ut så säker och mycket information som möjligt för ändamålet. Ibland är kunskapen om skador som inträffat eller skademekanismer som kan inverka på komponentens tillstånd begränsad och ökad kunskap är önskvärd. Speciella arrangemang eller kombinationer av provning kan då tillgripas där inte heller de efterföljande analyserna är rutinmässiga. I sådana situationer är det särskilt viktigt att provningen utförs på ett systematiskt sätt så att kända och okända effekter inte riskerar att förbises.

### 1.7.1 Uttag av materialprov

Ett materialuttag måste vara tillräckligt för att den provning som avses ska gå att genomföra på ett tillfredställande sätt. Olika slag av provning, provningens ändamål samt vilka provmetoder och provutrustningar som står till buds avgör hur mycket material som behöver tas ut, allt från mycket litet till relativt mycket. Om det materialuttag som fordras inte innebär att komponenten behöver repareras kan den följande provningen betecknas som halvförstörande. Ofta är syftet med provningen sådan att den önskade informationen från provningen endast kan förväntas erhållas från positioner som funnits vara kritiska. Sådana positioner är samtidigt ofta kritiska vad gäller möjligheterna till att ta ut material utan att minsta tillåtna godstjocklekar underskrids och möjligheterna till att utföra reparationer. Reparationer av komponenter som arbetar vid höga temperaturer behandlas ingående i Värmeforskrappport 657 (Storesund 1999) och Värmeforskrappport 693 (Storesund 2000).

Mekanisk provning kan innebära relativt stora materialuttag i jämförelse med till exempel prover för metallografisk undersökning eller kemisk analys. För vissa typer av

mekanisk provning kan miniatyrprovstavar användas. Metodik för kryppprovning med miniatyrprovstavar samt planering och metoder för materialuttag ges i slutrapporten för Nordtest Projekt 1032-92 (Borggreen 1994).

Noggrann planering av var och hur materialuttaget skall ske har generellt en avgörande betydelse för hela den undersökande processen. Positioner för materialuttag bestäms på underlag av en eller flera av följande typer av undersökningar:

- Beräkning av driftpåkänningar
- Mätning av driftpåkänningar
- Tillståndsovervakning - oförstörande provning
- Påträffade skador

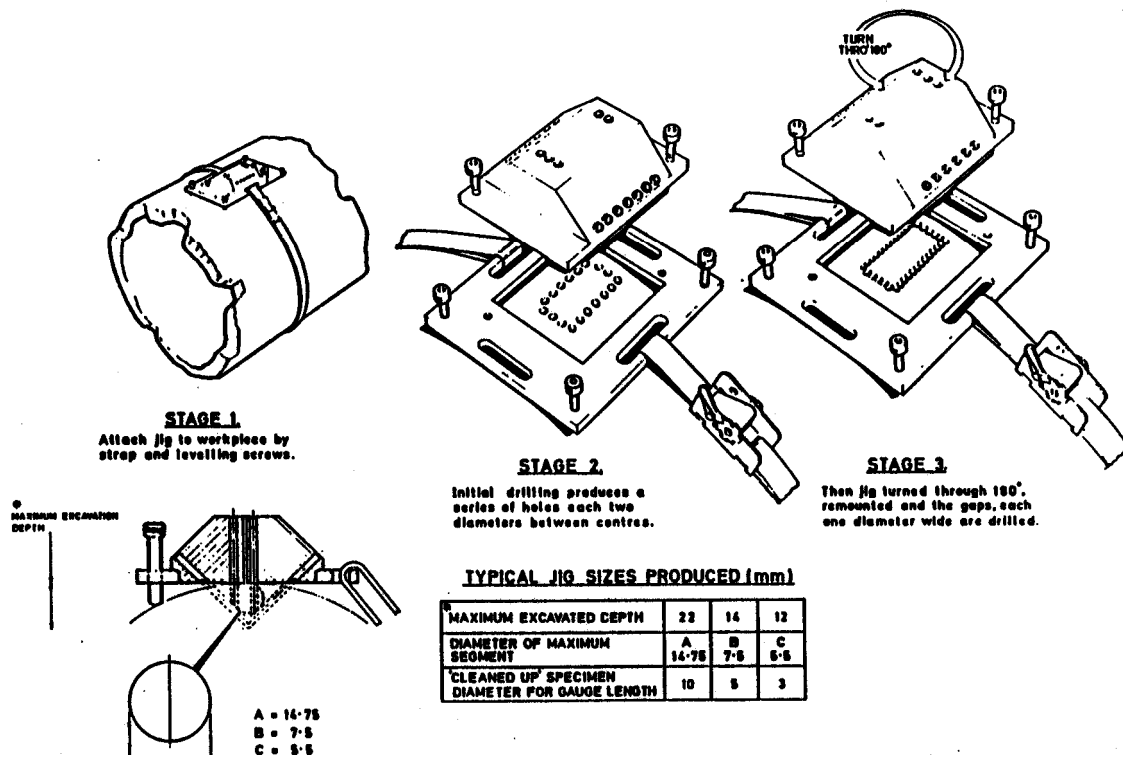
Det ideala området för materialuttag är inte sällan i konflikt med praktiska restriktioner som till exempel resultat av spänningsanalyser, dimensionering, åtkomlighet av området för materialuttaget, metod för materialuttag, reparationsmetod, revisionsperiod och kostnader. I slutändan kan därför materialuttaget därför bli annorlunda och mindre idealt än först planerat. Konsekvenserna av detta bör alltid vara vid medvetande då resultaten senare skall tolkas. Att prioritera ner nödvändiga insatser för att åstadkomma ett riktigt materialuttag med hänvisning till praktiska villkor är däremot inte att förorda. Ofta visar det sig i sådana fall i efterhand att man med enkla medel skulle kunna ha utfört ett materialuttag som möjliggjort högst betydligt bättre information från provningen.

Materialuttag från tunnväggiga komponenter är vanligen betydligt enklare att utföra än från tjockväggiga. Från pann- och överhettartuber, till exempel, kan ofta en bit enkelt skäras ut och en ny del svetsas in. En uppsättning "reservdelar" av förekommande tuber i anläggningen rekommenderas och finns också vanligen i lager. Påkänningarna på tuber i pannor kan i många anläggningar vara sådana att skador plötsligt uppstår och utvecklas snabbt. En annan och minst lika stor anledning till att ha reservtuber i lager är därför att vara rustad för att bättre kunna upprätthålla tillgängligheten.

För mindre materialuttag i tjockväggiga komponenter är så kallade båtprover vanliga. Sådana kan utföras med en vinkelslip och får en båtaktig form. Det finns för ändamålet tallriksformade skärskivor men sådana kan vara besvärliga att få tag på. Vid skärningen kan det vara svårt att få till den tilltänkta storleken. Överhettning och smetning måste undvikas, inte minst till prover för metallografisk undersökning (se [avsnitt 1.7.3](#)). Träning på något provstycke innan operationen utförs kan därför rekommenderas där även rätt typ av skärskiva provas ut.

Liknande form och storlek som ett båtprov kan erhållas med borrar med en jigg, se Figur 1.7-1. För båda metoderna ovan är det viktigt att efteråt slipa till avrundade former. Om det avverkade området inte behöver repareras skall slipningen vara sådan att spänningskoncentrationer minimeras.





Figur 1.7-1. Borrning med jigg för materialuttag (BarracloUGH 1985).

Figure 1.7-1. The principle of a drilling jig for material sampling (BarracloUGH 1985).

För större eller djupare materialuttag finns följande metoder att tillgå:

- *Sågning* med en handhållen bandsåg. Denna metod är långsam. Risk för överhettningar i samband med sågningen är mycket liten.
- *Pluggborrning*, vilket kan utföras med varierande diameter och helt igenom godset även i tjockväggigt gods (60 mm).
- *Electro-discharge machining* (EDM), vilket består av rörformad elektrod som sakta penetrerar materialet genom gnistbearbetning. En EDM utrustning kräver litet utrymme och sedan några år finns kommersiella produkter på marknaden. EDM används bl.a. till att skära ut en några mm tjock skiva ur en komponent för att användas till "Impression Creep Testing" (IC-testing) eller "Small Punsch Testing" (SP-testing), se [avsnitt 1.7.7](#).

Materialuttaget bör också utföras så att det inte står i konflikt med riktlinjer för provtagning i standarder. I svensk standard finns provtagning för dragprovning (SS-EN ISO 6892-1:2009 och SS-EN ISO 6892-2:2011 för rumstemperatur respektive förhöjd temperatur), slagprovning (SS-EN ISO 148-1:2010) och hårdhetsprovning (SS-EN ISO 6507-1).

**REFERENSER**

- Barraclough D R 1985. Sampling methods from engineering components for mechanical testing – particularly remnant life assessment. Eurotest Conference 'Remnant Life: Assessment and extension', Brussels 19<sup>th</sup> – 21<sup>st</sup> March 1985, paper SIII-6.
- Borggreen K & Storesund J, 1994. Remnant life assessment by use of miniature creep test specimens, final report for Nordtest Project 1035-92.
- Storesund J, 1999. Reparationssvetsning av kryppåkända komponenter i högtemperatur-anläggningar med rekommendationer, Värmeforskrapport 657.
- Storesund J, 2000. Förstudie beträffande livslängd hos kryppåkända svetsreparationer i ångsystem, Värmeforskrapport 693.

### 1.7.2 Kemisk analys

Ett antal metoder finns för att utföra kemiska analyser. De kan kategoriseras i:

- Bulkanalyser av ett material där ett eller flera grundämnen analyseras. Analys av många ämnen samtidigt kallas direktanalys.
- Vattenkemiska analyser där ett prov krävs för varje grundämne i ett material som skall analyseras.
- Analyser av ett lokalt område i ett material.
- Analysprofiler där sammansättningen nära ytan kan analyseras som en funktion av avståndet in i materialet.

Med kemisk analys i laboratorium av uttagna prover finns alltså betydligt större möjligheter att studera ett materials sammansättning än i fält där i princip endast bulkanalyser kan genomföras på ett begränsat antal material. Dessutom kan beläggningar av många slag analyseras i laboratoriet, till exempel oxider, korrosionsprodukter, vattensidiga avlagringar och korrosionsskydd.

Precisionen är varierande för olika metoder av kemiska analyser. Vattenkemiska analyser ger mycket hög noggrannhet medan till exempel utrustningar för analys med energidispersiv röntgenanalys kopplat till ett svepelektronmikroskop (SEM-EDS) typiskt kan ge variationer på flera procent och kan då endast betraktas som en halvkvantitativ analysmetod. Med analysutrustning ansluten till elektronmikroskop kan emellertid mycket små partiklar eller områden, ned till bråkdelar av en mikrometer, väljas ut och analyseras.

Optisk emissionsspektrografi (OES) är en metod som med laboratorieutrustning kan analysera många grundämnen samtidigt med hög precision. Med glimurladdningsspektrometri (GD-OES) är profilmätningar möjliga. Dessa metoder ställer krav på provstorlekar och provpreparering (särskilt planhet) och att prover med eventuella beläggningar inte är för porösa eller spröda. Liksom med utrustning som används i fält är omsorgsfulla kalibreringar nödvändiga inslag och mätning på referensprover av liknande material kan också vara nödvändiga för att riktiga resultat skall erhållas.

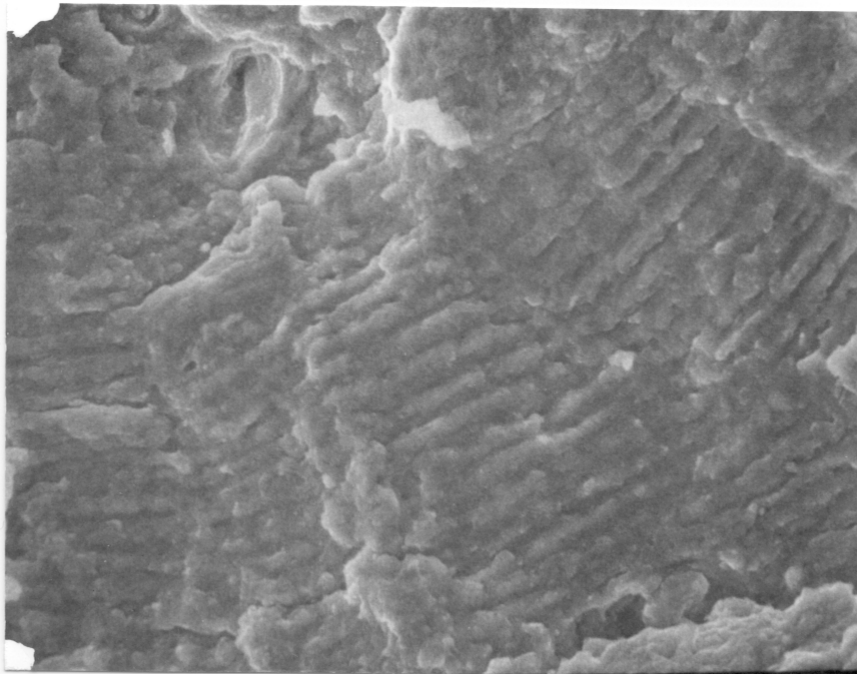
Varje metod har i regel sina begränsningar av vilka ämnen som kan analyseras och med vilken precision. Precisionen för analys av ett ämne kan för en del metoder påverkas av närvaron av andra ämnen som försvårar tolkningen av resultaten. Kemiska analysmetoder finns standardiserade och en översikt av SS-EN standarder finns i SIS-CEN/TR 10261:2013. Det som standardiserats är ett tjugotal metoder för analys av enskilda grundämnen i olika material som till exempel bestämning av kalciumhalt i järn och stål med spektrometrisk flamatomabsorptionsmetod och svavelhalt i järn och stål med gravimetrisk metod. Ytterligare ett antal EN ISO standarder av denna typ finns och är under utarbetande inom ECIS/TC 102.

### 1.7.3 Metallografisk undersökning

För en metallografisk undersökning är det väsentligt att material tas ut på ett riktigt sätt. Generella aspekter på materialuttag behandlas i [avsnitt 1.7.1](#). Det förtjänar att här understryka att även en måttlig upphettning vid skärbetet kan påverka mikrostrukturen. Temperaturen i de områden som senare ska studeras rekommenderas för stål att inte få överstiga 300°C. Tillfälle till planering av materialuttaget rekommenderas så att önskvärda positioner och kvantiteter kan diskuteras och bestämmas innan utförandet.

Metallografisk undersökning innebär studier av brottytor om sådana förekommer och snitt som preparerats metallografiskt. Brottytor från komponenter måste hanteras varsamt och inte utsättas för korrosiv miljö. Till exempel innebär detta att fingrande och fukt skall undvikas. Skydd i form av något som kommer i kontakt med brottytan skall också undvikas.

BroTTYtor studeras i ljusoptiska stereomikroskop som ger bra skärpedjup. De är begränsade till måttliga förstoringar, typiskt upp till 50x. I svepelektronmikroskop (SEM) kan broTTYtor undersökas från ca 50 till flera tusen gångers förstoring. Viktig information erhålls ofta även från visuella betraktelser med oöppnat öga. BroTTYtor studeras normalt utan preparering. Figur 1.7-2 visar broTTYtan av en termisk utmattningsspricka i SEM. Bilden visar en transkristallin spricktillväxt med striationer (se vidare [avsnitt 1.5.1.3](#)).



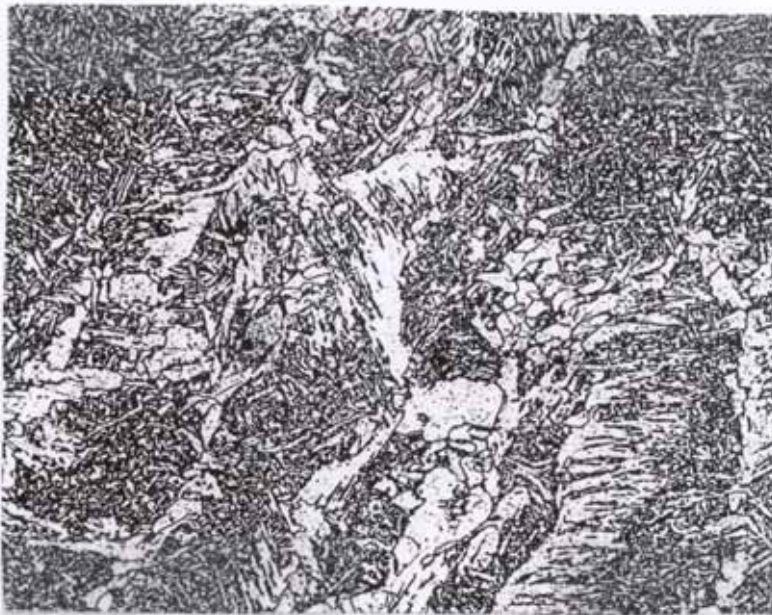
**Figur 1.7-2.** BroTTYta av en termisk utmattningsspricka i ett rostfritt stål 253MA i SEM vid 1500x förstoring [Institutet för Metallforskning].

**Figure 1.7-2.** Fracture surface of a thermal fatigue crack of a 253MA stainless steel in SEM at 1500x magnification [Swedish Institute for Metals Research].

Metallografiska snitt prepareras genom successiv slipning och polering till en repfri yta. Detta uppnås vid mekanisk polering då polermedlet i slutsteget har en kornstorlek på 1µm. Polering kan även utföras elektrolytiskt. Innan slipningen kapas provet i snitt med för undersökningarna lämpliga orienteringar och storlekar. För att kunna hantera proverna praktiskt, underlätta plan slipning och eventuell hårdhetsprovning är det vanligt att proverna bakas in i cylindriska plastkutsar. Diametern på sådana plastkutsar är typiskt 20-40 mm. Vid granskning av kvaliteten på korrosionsskyddande oxidskikt, magnetit, samt beläggningar på tubprover fordras kutsar av kallhårdande epoxi. Med ordinära, mjukare, bakelitkutsar blir plasten, eventuella beläggningar samt även

magnetiten avrundade närmast metallytan vid provprepareringen och kan därmed inte karaktäriseras.

Viktig information kan erhållas från det polerade provet i oetsat tillstånd vid mikroskopi. Den allra mesta informationen ges dock efter etsning så att mikrostrukturen framträder. En etsning innebär att ett lösningsmedel avverkar den polerade ytan. Ett metalliskt material är uppbyggt av kristaller vilka i sin tur kännetecknas av en atomuppbyggnad i olika kristallografiska riktningar. Lösningsmedlets avverkning styrs av de kristallografiska orienteringarna i kristallen. Olika kristaller är dock godtyckligt orienterade till varandra vilket innebär att lösningsmedlets avverkning sker individuellt för varje kristall. Detta skapar reliefer och ljusskillnader på ytan som gör att mikrostrukturen kan tolkas. Det finns många olika etsblandningar och etsförfaranden att tillgå. Val av etsmedel och etsmetodik är beroende av material och strukturbeståndsdelar eller andra fenomen som är föremål för undersökning. Figur 1.7-3 visar ett svetsmaterial i låglegerat stål i ljusoptiskt metallmikroskop (LOM). Figuren visar utsträckta områden i höjdlid, så kallade pelarkristaller. Smältan har först stelnat vid fogens kylande yta och de kristaller som bildats har under fortsatt stelnande växt till i riktning från denna. Efter stelnandet har slutligen strukturbeståndsdelarna ferrit (vita områden i figuren) och bainit (övriga områden) skiljts ut.



**Figur 1.7-3. Svetsmaterial för ett 0.3%Mo stål i 230x förstoring.**

**Figure 1.7-3. Weld metal for a 0.3%Mo steel at 230x magnification.**

Metallografiska undersökningar genomförs i stor utsträckning med LOM som kan förstora upp till 2000x. Förstoringar över 1000x innebär omständligare procedurer och används därför sällan vid rutinarbete. Belysningen är rakt påfallande men även snedbelysning och mörkfältsbelysning kan ställas in på de flesta ljusmikroskop för att ytterligare kunna utnyttja optiska effekter av etsningen. Polariserat ljus kan användas

på oetsade prover för att se detaljer från vissa mikrostrukturer som är svåra att etsa. Skärpedjupet i LOM är litet.

SEM har betydligt bättre skärpedjup och upplösningförmåga än LOM. Förstoringer upp till 50000x är möjliga. I SEM alstras en elektronström där elektronernas strålningsegenskaper utnyttjas. Strålarna reflekteras från objektet som vanligt ljus men våglängden är avsevärt mindre vilket resulterar i den högre upplösningförmågan. Principen för SEM är att styra en tunn elektronstråle så att den sveper över objektet, samla in reflektionen i en detektor och presentera detta på en bildskärm. Vakuummiljö är nödvändigt för att elektronstrålarna inte skall spridas. Undersökningar i SEM blir vanligtvis mer tidskrävande än i LOM på grund av in- och utslussningar till vakuumkammare samt nödvändiga inställningar. Provpåberedningen för SEM är i princip likadan som för LOM. Ickemetalliska prover måste dock göras metalliskt ledande för att kunna granskas i SEM, t.ex. genom att sputtra på ett mkt tunt skikt av guld eller aluminium i en vakuumkammare. Storleken av ett LOM medger att det kan stå på ett bord medan SEM traditionellt är skrymmande och fyller ett större rum. Numera finns dock även bords-SEM. De är relativt billiga men har begränsade prestanda.

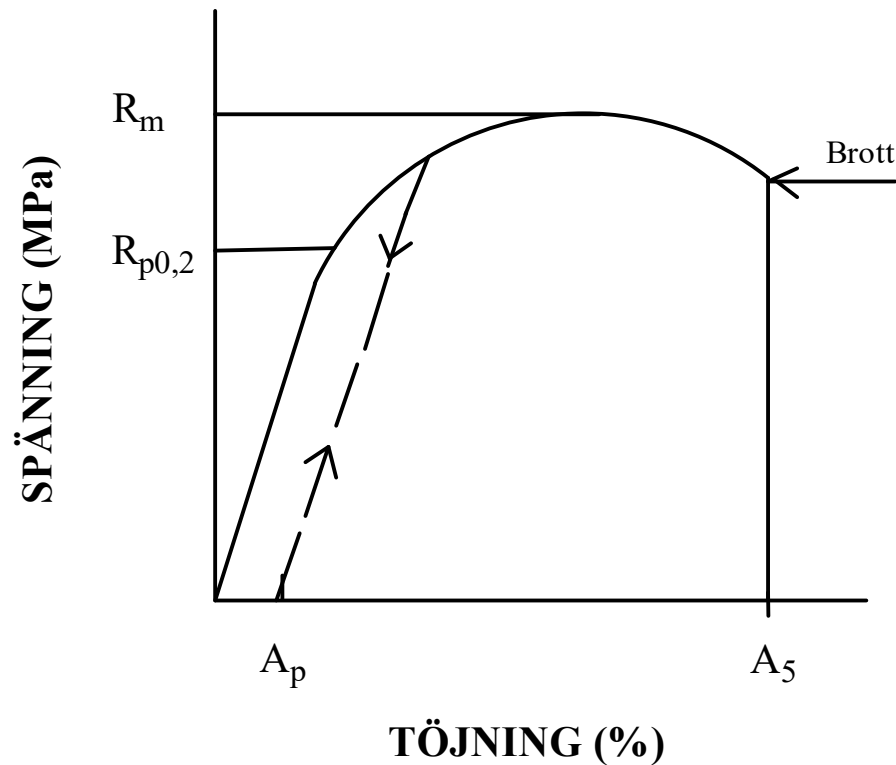
Undersökningar med transmissionselektronmikroskop (TEM) är tidskrävande. Detta gäller framför allt provpåberedningen där små och mycket tunna extrakt eller repliker av materialet tas fram, tunna nog för att kunna genomlysas av en elektronstråle. Detta möjliggör studier av ytterligare fenomen i materialstrukturen som till exempel vissa typer av dislokationsstrukturer (se [avsnitt 1.5.2](#)) samt kristallografisk information. TEM används främst för forskningsinriktade ändamål.

Mikroskop är utrustade med kamera. Dessutom finns bildbehandlingsutrustning för att kunna göra manuella mätningar och automatiska bildbehandlingar direkt vid mikroskopet, till exempel för bestämmande av storlekar och fördelningar av beståndsdelar eller skadebildningar i mikrostrukturen. Till SEM och TEM finns även utrustning för att kunna analysera materials och strukturbeståndsdelars sammansättning i anslutning till de metallografiska undersökningarna.

#### 1.7.4 Dragprovning

Under ett dragprov registreras draglasten och förskjutningen av en provkropp. Dragprovning utförs överlag i enaxligt tillstånd där vanligen en rund eller, ibland, en rektangulär provstav dras till brott. Ett schematiskt exempel på spännings- och förlängningssambandet som då erhålls i provstaven visas i Figur 1.7-4. Från en sådan kurva kan ett antal storheter som karaktäriserar materialet erhållas. De som i allmänhet har störst betydelse är brottgräns ( $R_m$ ), sträckgräns ( $R_{p0.2}$ ), och brottförlängning ( $A_5$ ).





Figur 1.7-4. Exempel på sambandet mellan spänning och töjning i ett enaxligt dragprov.

Figure 1.7-4. Example of the stress versus strain relationship in a uniaxial tensile test.

Brottgränsen är enligt definition den maximala spänningen beräknat på ursprungsarean och är markerad på kurvan. Exemplet i figuren gäller för ett mjukare material där det är vanligt att lokal töjning uppstår och en midja bildas på provstaven i slutet av dragprovet. Att kurvan faller beror på att en midja bildats och spänningen beräknats på ursprunglig provstavsarea. En mer relevant definition av brottgränsen skulle vara materialets medelspänning i provstavens minsta sektion vid brottögonblicket.

Sträckgränsen är ett gränsvärde där elastisk töjning övergår till plastisk. Detta åskådliggörs på kurvan där den inledningsvis konstanta lutningen övergår till en avtagande. Denna övergång är mer eller mindre markant för olika material.  $R_{p0,2}$  definieras som den spänning då den permanenta deformationen är 0.2%.

Kurvans slut i x-led utgör brottförlängningen. Förlängningsvärdet definieras från den ursprungliga mätlängden och den som uppmäts på den avdragna provstaven. Om en midja bildas är de lokala deformationerna inräknade vilket innebär att olika provstavsgeometrier inte är helt jämförbara. Indexet på förlängningen  $A$  anger förhållandet mellan mätlängd och diameter (för andra än cirkulära tvärsnitt beräknas en "effektiv" diameter), vanligast är  $A_5$  och  $A_{10}$ . Både den homogena areaminskningen och midjebildningens inverkan på brottgräns och förlängning kan analyseras men detta kräver mätning av areaminskningen under provningen. Ibland bestäms även kontraktionen,  $Z$ , vilket är den procentuella areaminskningen på brottstället. Utöver provstavsgeometrier kan även deformationshastigheten påverka provresultaten.



Den streckade linjen med pilar illustrerar vad som händer då ett prov avlastas efter en viss permanent deformation (nedåtgående pil) och sedan pålastas igen (uppåtgående pil). Denna, för både av- och pålastning gemensamma, räta linje har samma lutning som den räta delen vid den inledande pålastningen. Så länge lutningen är konstant deformeras materialet elastiskt och lutningens storlek representerar materialets E-modul. Den permanenta deformationen är den som kan avläsas på x-axeln då provet är helt avlastat ( $A_p$  i figuren). Vid den nya pålastningen deformeras materialet elastiskt ända till den spänning som rådde i materialet då avlastningen började. Materialet har hårdnat vid den tidigare plastiska deformationen och en förhöjd sträckgräns är en effekt av detta. Den tidigare deformationen innebär också att en del av materialets duktilitet (brottförlängning) är förbrukad.

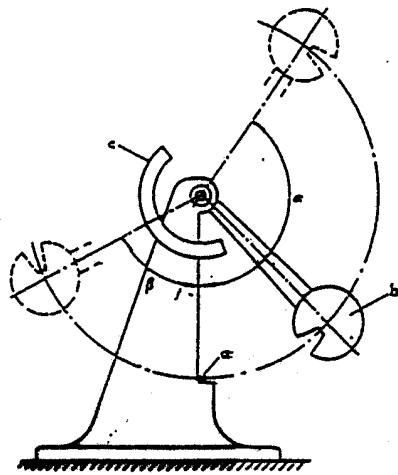
Temperaturen påverkar ett materials mekaniska egenskaper. Varmdragprovning utförs därför till exempel för att bestämma beräkningsvärden vid dimensionering av komponenter som arbetar vid förhöjda temperaturer (vid tillräckligt höga temperaturer blir krypning dimensionerande, se [avsnitt 1.5.2](#)). Ett annat skäl till att utföra varmdragprovning är att fastställa om ett driftpåkännt material som befarats ha blivit utsatt för till exempel överhettning har kvar tillräcklig sträckgräns, brottgräns och duktilitet för att fortsatt drift skall kunna tillåtas. Ett materialprov från det mest kritiska området måste då tas ut från komponenten. Varmdragprovet utförs vanligen med en ugn som omsluter provet men kan även utföras med induktiv uppvärmning. Temperaturen måste mätas över provstavens hela provlängd och standardiserade temperaturlöslanser måste uppfyllas. Både vid låga och höga temperaturer rekommenderas dubbelprovning och minst en reservprovstav att ta till om något skulle gå fel vid provningen.

Provstavar och provningsprocedurer är standardiserade för att resultat skall kunna jämföras med varandra (exempelvis svensk standard SS EN 10002-1 eller amerikansk standard ASTM E8/E8M-13a). Det finns även standarder för bestämning av E-modul, tvär-kontraktionstal, Poissons tal  $\nu$  och skjuvmodul,  $G$ .

#### 1.7.5 Slagseghetsprovning

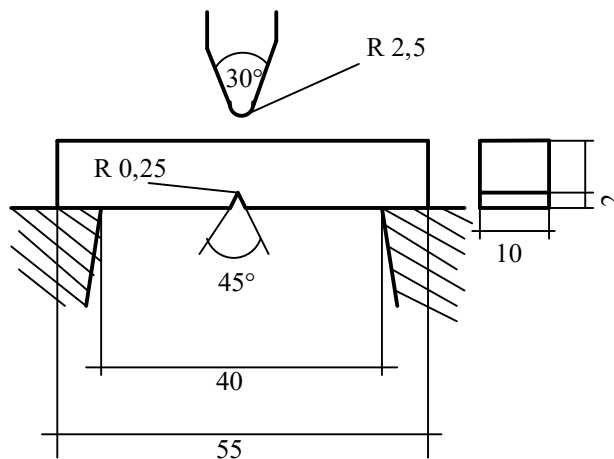
Slagseghetsprovning är avsedd att gradera materials känslighet för sprött brottbeteende. För att en komponent eller konstruktion skall spricka spontant fordras förutom sprött beteende någon form av anvisning och att den utsätts för dragspänning eller slag.

Provningen utförs på provstavar med kvadratisk tvärsektion som slås av i en pendelhejare. Figur 1.7-5 visar en så kallad Charpy-hejare. En slagprovstav har en anvisning som är formad som ett V, ett U eller som ett "nyckelhål". Figur 1.7-6 visar standardmått för Charpy-V provstaven (som är den vanligaste provstavstypen), hejarens utformning där den slår i provstaven och att mothållets öppning skall vara 40 mm. I anvisningen utvecklas ett komplicerat fleraxligt spänningstillstånd och det går därför inte att jämföra resultat där provningen har haft geometriska skillnader. Det går heller inte att räkna om resultat mellan olika anvisningstyper på ett tillförlitligt sätt. Ett materials slagseghet är dessutom dimensionsberoende, ett klen gods är segare än ett grovt av samma material, vilket gör att resultat från klenare provstavar inte direkt kan översättas till standardstorlekens.



Figur 1.7-5. Charpy-hejare för slagprovning.

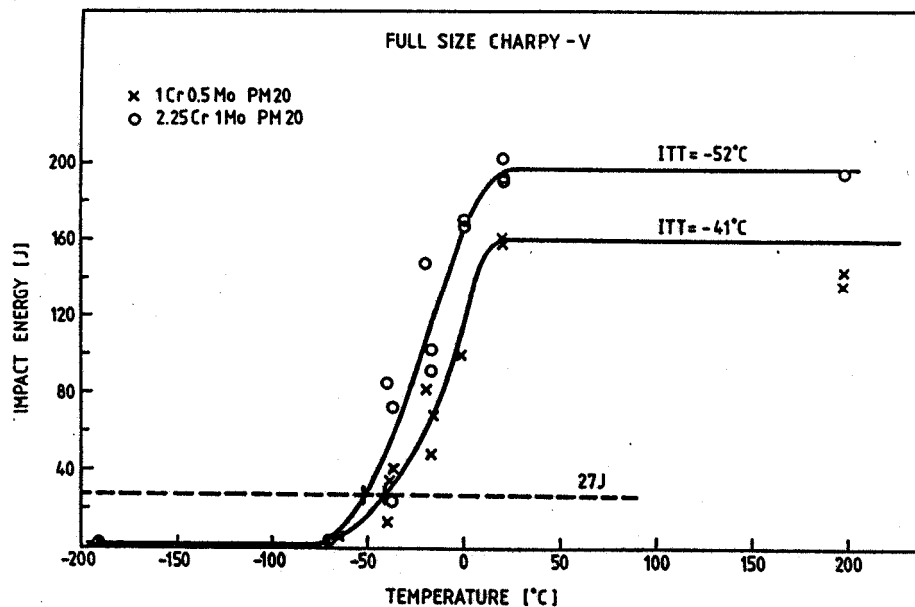
Figure 1.7-5 Charpy test machine.



Figur 1.7-6. Charpy-V provstav i provningsposition.

Figure 1.7-6. A Charpy-V test piece in test position of the test machine.

Slagprovstavar slås ofta av vid några olika temperaturer och Figur 1.7-7 visar typiska slagprovkurvor för två låglegerade varmhållfasta stål. Slagenergin i Joule (J) är avsatt mot temperaturen i diagrammet. Vid högre temperaturer är energiabsorptionen för att slå av staven stor vilket kallas högvärdesområdet eller övre energinivån. Brottytan får ett fibrigt eller trådigt utseende med läppbildning, vilket indikerar att plasticering har skett. Vid låga temperaturer, lågvärdesområdet eller den undre energinivån, blir däremot energiabsorptionen låg. Brottet blir sprött och brottytan får ett kristallint utseende utan spår av plasticering. Övergången mellan hög- och lågvärdesområdena sker ofta inom ett snävt temperaturintervall, övergångsområdet, där man har blandbrott. Slagprovning är förknippat med spridning i resultaten, särskilt i övergångsområdet. Provning utförs därför alltid med minst tre prover vid samma temperatur. För att kunna producera jämförbara resultat är det viktigt att slagprovmaskinen är kalibrerad enligt de standarder som finns.



Figur 1.7-7. Slagseghetskurva för två ferritiska stål.

Figure 1.7-7. Impact energy vs. Temperature for two ferritic steels.

Ett materials övergång från segt till sprött brott kan karaktäriseras med en omslagstemperatur, ITT (Impact Transition Temperature). Detta innebär vanligtvis temperaturen för en viss energiabsorption på slagseghetskurvan. I gällande EN-normer finns olika seghetsklasser att välja på. Val av seghetsklass är beroende materialets förmåga att motverka sprött brott. Faktorer som laster, konstruktionsutformning och temperatur har inverkan på ett materials seghetsegenskaper inverkar på val av slagseghetsklass. Klass J, K och L motsvarar 27 J, 40 J respektive 60 J. Den temperatur där brottet är 50 % sprött och 50 % segt är ett annat sätt att definiera omslagstemperaturen (FATT). Genom att mäta andelen sprött brott på provstavar och plotta detta mot provningstemperaturen i ett diagram kan FATT bestämmas.

Vid gruppering av stål i kvalitetsklasser ingår krav på slagsegheten. För de flesta materialapplikationer i högttemperaturanläggningar är drifttemperaturen betryggande hög för att sprödbrott inte skall inträffa, även om relativt låga krav ställs på materialets omslagstemperatur. Risker kan däremot föreligga vid provtryckningar. Slagsegheten är ofta lägre i svetsar än i grundmaterial. Både svetsmaterial och värmepåverkad zon kan ha väsentligt lägre slagseghet än grundmaterialet. Slagprovning av svetsar är därför ofta befogad då nya svetsarbeten utförts i en anläggning. Vid provning av svetsar är det viktigt att omsorgsfullt ta ut och tillverka provstavar så att de delar av svetsen man önskar prova verkligen representeras av provet. Sådan provning rekommenderas också att verifieras efteråt. Detta utförs med makroetsning av provstavar för att kontrollera notcharnas läge och brottets propagering. Brottets propagering bör även studeras med metallografiska undersökningar.

I äldre anläggningar kan materialen ha försprödats, vilket innebär att risken för sprödbrott bör omvärderas och provning kan vara befogad. Ett materials omslagstemperatur ger generellt bara indikationer på brottbeteendet i den konstruktion som skall bedömas. Inte desto mindre finns metoder för att översätta

slagen energier till brottmekaniska parametrar (**avsnitt 1.7.6**). Sådana bör bara tillämpas om brottmekanisk provning inte är möjlig och att ett högt mått av konservatism kan visas.

I svensk standard finns riktlinjer för Charpy provning med V och U-notch (SS-EN ISO 148-1:2010) samt kontroll av Charpy-hejare (SS-EN ISO 148-2:2009/ SS-EN ISO 148-3:2009).

#### 1.7.6 Brottmekanisk provning

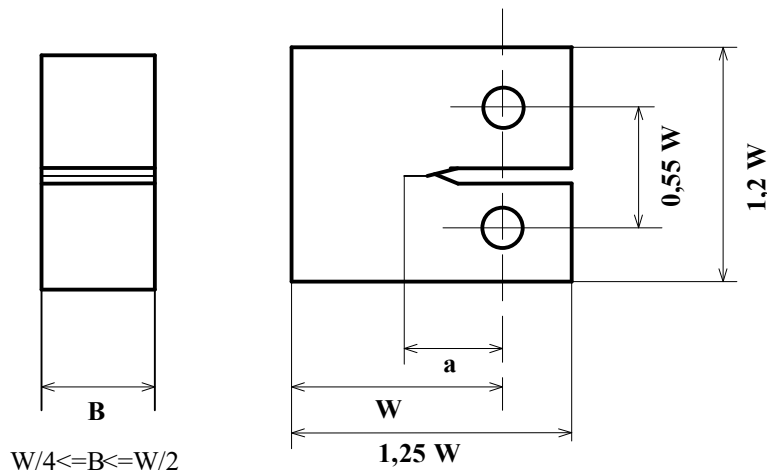
Brottmekanik är den delen av hållfasthetsläran som behandlar sprickors beteende. I allmänhet avses de fall där en spricka eller en annan defekt leder till kraftiga spänningskoncentrationer. Brottmekanisk provning går ut på att bestämma de materialparametrar som behövs för att modellera brottförloppen i närvaro av skarpa anvisningar. Brottmekaniken omfattar många olika teorier för analys av brott. Dessa kan indelas i två huvudgrupper:

- Linjär brottmekanik, som är baserad på rent linjärt elastiskt materialbeteende.
- Olinjär brottmekanik, som är tillämpbar på spänningsnivåer som plasticerar materialet.

##### Linjär brottmekanik - brottseghet

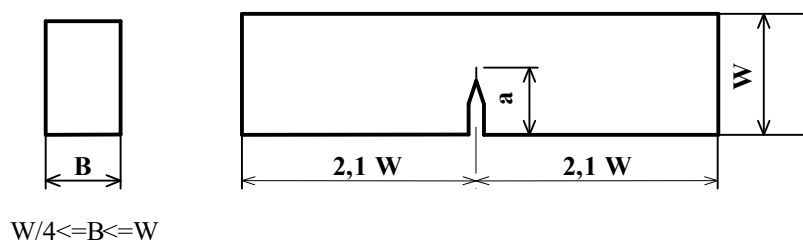
Den linjära brottmekaniken förutsätter att plasticeringen vid sprickspetsen är obetydlig. Som belastningsparameter används då spänningskoncentrationsfaktorn,  $K$ . Vid statisk belastning antas spricktillväxt ske då  $K$  uppnått en kritisk nivå,  $K_{Ic}$ , som är en materialkonstant. Linjär brottmekanisk provning går ut på att bestämma brottsegheten,  $K_{Ic}$ . För att det värde på brottsegheten som tas fram vid provningen skall kunna göra anspråk på att vara en materialkonstant ställs bland annat krav på provstavens tjocklek, belastning och notch.

Två provstavstyper har stor användning vid bestämning av brottseghet, CT-provstaven (Compact Tension) och SEN(B)-provstaven (Single Edge Notched Bend), se Figurerna 1.7-8 och 1.7-9. Innan provningen förses notchen med en förspricka i syfte att erhålla en rak och skarp sprickfront. Försprickan framkallas genom utmattning. Under provningen registreras samhörande värden på last och notchvidgning på så sätt att begynnande spricktillväxt kan registreras. Spricklängden används vid utvärderingarna av brottsegheten och skall kunna mätas efter provningen. Precisionen vid linjär brottseghetsprovning indikeras av att en standardavvikelse på ca 5% kan uppnås då material av jämnaste kvalitet provas.



Figur 1.7-8. CT-provstav

Figure 1.7-8. CT-specimen



Figur 1.7-9. SEN(B)-provstav

Figure 1.7-9. SEN(B)-specimen

### Linjär brottmekanik-utmattning

Vid så kallad högcykelutmattning (se [avsnitt 1.5.1](#)) rör sig spänningarna generellt i området för elastiska deformationer. Utmattningssprickors tillväxt från skarpa defekter kan därför modelleras med hjälp av variationen i spänningsintensitetsfaktor.

Skillnaden mellan den högsta och lägsta spänningsintensitetsfaktorn,  $\Delta K$ , i belastningscykeln används då som parameter för sprickans tillväxt. Inom ett stort belastningsintervall gäller, åtminstone approximativt, ett samband kallat Paris lag som kan formuleras

$$da/dN = C(\Delta K)^n$$

där  $da/dN$  är spricktillväxt per belastningscykel. C och n är konstanter. Vid låga belastningar sjunker tillväxthastigheten för att, åtminstone till synes, upphöra under ett visst  $\Delta K$ . Detta värde kallas tröskelvärdet  $\Delta K_{th}$ . Brottmekanisk utmattningsprovning går ut på att bestämma konstanterna i Paris lag och eventuellt på att bestämma tröskelvärdet.

Vid tillämpning av "klassisk" utmattningsfilosofi (se [avsnitt 1.5.1](#)) provas släta provstavar vilket innebär att både antalet cykler till sprickinitiering och cyklisk

spricktillväxt omfattas av provningen. I resultaten är det emellertid svårigheter att separera de två stegen.

Vid den brottmekaniska provningen utsätts en CT-provstav (rekommenderad provstavstyp) för en variation i K och spricktillväxten som funktion av antalet cykler mäts. Amplituden som K varierar inom, hålls konstant. K beror av spricklängden och därför bör denna kunna mätas kontinuerligt så att belastningen hela tiden kan justeras till konstant amplitud av K. Ursprungligen hölls lastamplituden konstant och sprickan mättes med ett mobilt mikroskop, en metod som fortfarande används. Sprickan kan även övervakas med den så kallade kompliansmetoden, där sambandet mellan kraft och deformation bestäms under små avlastningar. Ur kompliansen kan spricklängden beräknas.

En vanlig metod för bestämning av tröskelvärde är initiera en utmattningsförspricka vid ett  $\Delta K$  värde som ligger i området för spricktillväxt där Paris lag är tillämpbar. Spänningsomfånget och därmed  $\Delta K$  minskas stegvis till ingen spricktillväxt kan registreras. Tröskelvärdet kan vara svårt att uppmäta eftersom sprickhastigheterna blir mycket små och ett mycket stort antal cykler erfordras. Dessutom har metoden ovan ifrågasatts bland annat för att det som bestäms snarast kan karaktäriseras som ett tröskelvärde för sprickuppbromsning. Ett par metoder som gör det praktiskt möjligt att bestämma tröskelvärdet motsatta vägen finns dock föreslagna. Sprickhastigheterna vid tröskelvärdesbestämningar är ofta så små att ofullkomligheter i utrustningen blir utslagsgivande. I standarden ASTM E 647 ges därför en operationell definition av tröskelvärdet som är  $\Delta K$  vid sprickhastigheten  $10^{-10}$  m/cykel. Detta värde bestäms genom linjär extrapolation av fem uppmätningar i intervallet  $10^{-9}$  -  $10^{-10}$  m/cykel.

Korrosionsutmattning är en vanlig skadetyper i till exempel lågtrycksdelar av ångturbiner. För att bestämma ett materials korrosionsutmattningssegenskaper kan utmattnings-provningen utföras i korrosiva miljöer. Sådan provning utförs, särskilt om det är fråga om brottmekanisk utmattningsprovning, i betydligt mindre omfattning än provning i luft, till exempel på grund av att den kräver en mer komplicerad utrustning. Resultat visar dock att utmattningssegenskaperna ofta är avsevärt mycket sämre i vissa miljöer och att rangordningen mellan olika material kan ändras under korrosiv inverkan.

#### Olinjär brottmekanik - brottseghet

Moderna material har ofta hög grad av duktilitet och avsevärd plasticering föregår sprickpropagering. En parameter som karaktäriserar belastningen vid plasticering är J-integralen. Olinjär brottmekanisk provning kan utföras för att bestämma ett kritiskt värde på J där spricktillväxt sker,  $J_{Ic}$ . Också detta värde benämns brottseghet men har en annan dimension än brottsegheten vid linjär provning. Olikheter i metoder vid bestämning av  $K_{Ic}$  och  $J_{Ic}$  gör att några samband mellan dessa parametrar inte existerar.

För duktila material erhålls ofta stabil spricktillväxt där belastningen gradvis måste ökas för att vidmakthålla spricktillväxten. Olinjär brottmekanisk provning används för att fastställa samband mellan spricktillväxt och pålagt J, så kallade J-R-kurvor. Dessa ger ett mått på materialets motståndskraft mot spricktillväxt.

Liksom vid den linjära provningen används främst CT eller SEN(B)-provstavar. Kraven på provstavarna liknar de som ställs för linjär provning. CT-provstaven bör förses med sidospår i sprickplanet för att erhålla gynnsamma spänningsfördelningar. Provning utförs med enstavs- eller flerstavsmetoden. Vid enstavsprovning bestäms

spricktillväxten under provets gång, vanligtvis med kompliansmetoden. Vid flerstavsprovning belastas likadana provstavar till olika  $J$  varefter spricklängden mäts upp. Flerstavsmetoden har fördelen att spricktillväxten kan uppmätas säkert. Nackdelen är, förutom att fler provstavar går åt, att spridningen mellan provstavar kan göra utvärderingen svår.

Vid utvärdering beräknas samhörande värden på spricktillväxt och pålagt  $J$ . Sambandet mellan yttre arbete och  $J$  är beroende av provstavsgeometrin.  $J$ - $R$ -kurvan ritas sedan upp och  $J_{lc}$  definieras vid någon punkt på kurvan. Provningsen skall valideras efteråt där bland annat dimensionskrav, geometrikrav, antal användbara mätpunkter och deras inbördes lägen skall kontrolleras. Precisionen är vanligtvis sämre än vid den linjära provningen. En standardavvikelse i storleksordningen 20 % är att räkna med. Liksom för  $K_{Ic}$  är tanken att  $J_{lc}$  skall utgöra en materialkonstant. Detta är emellertid inte verifierat i lika stor utsträckning för  $J$  som för  $K$ . För båda materialparametrarna gäller att de värden som tas fram är specifika för den standard som följts. Jämförelser av resultat som tagits fram enligt olika standarder bör, särskilt för olinjär brottseghet, göras med försiktighet.

Det finns andra sätt att karaktärisera duktila materials brottegenskaper. Ett sätt är att fastställa hur mycket brottytorna kan separeras i sprickspetsens närhet innan sprickan börjar propagera med måttet COD, Crack Opening Displacement. En fördel med COD är att det, i princip är en direkt uppmätbar kvantitet. En nackdel är att COD är betydligt besvärligare att beräkna ur den yttre lasten än  $J$ .

#### Olinjär brottmekanisk provning - krypsprickpropagering

En annan del av den olinjära brottmekaniken är sprickbeteenden vid höga temperaturer då deformationen vid en konstant spänning ökar med tiden - krypsprickpropagering. Provningsen utförs, liksom vid krypprovning, i en ugn med en konstant last. CT-provstavar är vanligast men även platta dragprovstavar med notchade sidor eller med notch i centrum förekommer. De sistnämnda kan vara fördelaktiga om de driftpåkänningar som skall efterliknas uteslutande består av dragspänningar. Liksom vid provning av olinjär brottseghet rekommenderas sidospår på CT-provstavar. Provstavens notch kan antingen förses med en förspricka med hjälp av utmattning eller med en gnistbearbetad slutdel med mycket liten radie (0.1 mm). Övervakning av temperaturen sker med samma precision som vid krypprovning.

Under provningen mäts lastlinjens och spricköppningens förskjutning samt spricktillväxten kontinuerligt. Vanligen används extensometrar och töjningsgivare för att registrera hur provstaven öppnar sig. Spricklängden registreras vanligast genom att föra ström genom provstaven och mäta den förändring av spänningen som uppstår då sprickan växer. Spricktillväxt medför nämligen en minskad area i sprickplanet och därmed ett ökat elektriskt motstånd och spänning. Provet bör avbrytas innan slutbrott för att säkert kunna mäta den längd av sprickan som tillväxt genom krypning. Med uppmätt slutlängd av sprickan kan sedan spänningsökningen översättas till spricklängd och tillväxthastigheten av sprickan räknas ut.

Den mest etablerade parametern för att karaktärisera krypspricktillväxten betecknas  $C^*$ . Det finns varianter av denna parameter som bättre kan beskriva vissa typer av belastning. Dessutom finns andra koncept där man arbetar med referensspänningar som inte har sitt ursprung i brottmekaniken.  $C^*$  är relaterad till hastigheten i krypförskjutning, spänning och provstavsbredd och beräknas från mätningarna under provningen. Provresultaten presenteras genom att plotta spricktillväxthastigheten mot



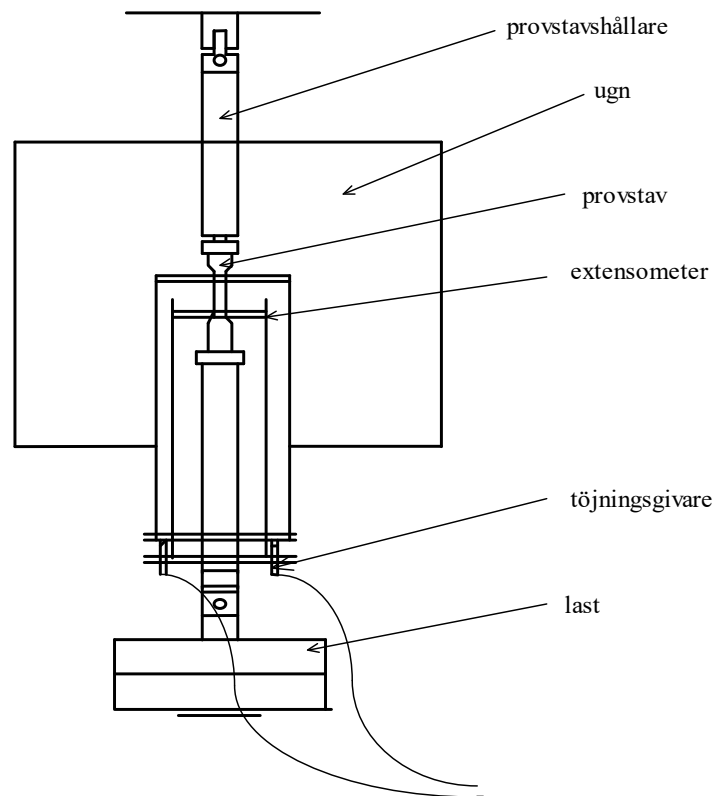
$C^*$ . Spricktillväxthastigheten visar typiskt en korrelation till  $C^*$  på likadan form som Paris lag. Materialkonstanterna är beroende både av temperatur och av spänningstillstånd.

Metoder för brottmekanisk provning har utarbetats på flera håll. Nedan ges exempel på etablerade standarder:

|                    |                                         |
|--------------------|-----------------------------------------|
| ASTM E 399         | linjär provning, $K_{Ic}$               |
| ASTM E 647         | linjär provning, utmattning             |
| ASTM E 813         | olinjär provning, $J_{Ic}$              |
| ASTM E 1152        | olinjär provning, J-R-kurvor            |
| ASTM E 1457-92     | olinjär provning, krypsprickpropagering |
| BS 7478-1:1991     | COD-provning                            |
| BS ISO 12108:2002  | linjär provning, utmattning             |
| EGF P-2-90D        | linjär och olinjär provning             |
| ISO/DIS 12737:1996 | linjär provning                         |
| ISO/CD 12135       | linjär och olinjär provning             |

#### 1.7.7 Krypprovning

Det vanligaste sättet att krypprova ett material är att utsätta en enaxlig cirkulär provstav för en konstant belastning vid en konstant temperatur. Lasten och temperaturen är sådana att materialet deformeras med tiden, se [avsnitt 1.5.2](#). Figur 1.7–10 visar principen för krypprovning. De flesta krypprovmaskiner belastas av praktiska skäl inte direkt under provstaven utan är konstruerade med en hävarm. Kraven på utrustningen är höga. Den skall vara stabil vid höga temperaturer och långa tider där provstavens temperatur och förskjutning mäts med stor noggrannhet. Detta fordrar regelbundna kontroller och kalibreringar. Linjäritet i provstavens belastning är av stor betydelse. Varje provstav samt hävarmar, laststänger och alla hållare måste därför vara omsorgsfullt konstruerade och tillverkade.

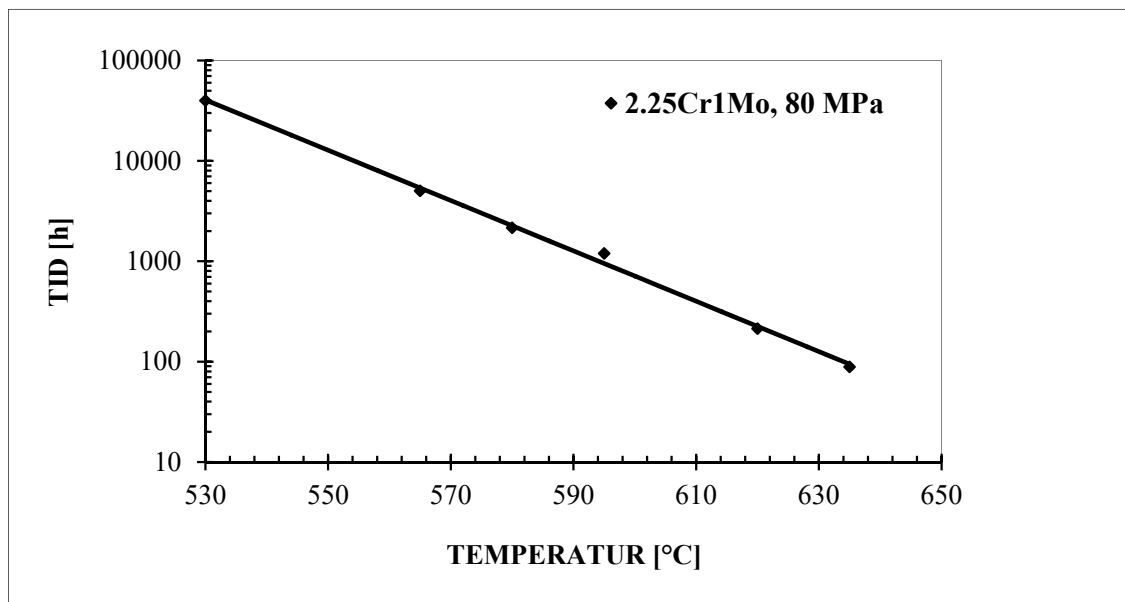


**Figur 1.7-10. Principen för krypprovning.**  
**Figure 1.7-10. The principle of a creep test.**

Likheter med ett dragprov föreligger i fråga om provstavens deformationsbeteende: en homogen areaminskning under större delen av provningen följt av en midjebildning mot slutet. Material eller materialtillstånd med låg krypduktilitet visar dock liten eller ingen midjebildning. Vid krypprovning kan deformationsbeteendet ändras med ändringar av last och temperatur. Detta beror på att krypdeformation omfattar olika deformationsmekanismer som är verksamma inom olika spännings- och temperaturområden. Inom vilka områden olika deformationsmekanismer verkar varierar från det ena materialet till det andra.

Oftast är det ett materials egenskaper under driftpåkänning som är intressanta. Eftersom driftpåkänningar typiskt innebär brottider på hundra tusen timmar och däröver är krypprovning i de allra flesta fall mer eller mindre accelererad. Relevant information om ett materials krypegenskaper fordrar att en serie av krypprover utförs. Ett vanligt sätt är att prova vid en konstant temperatur, ofta motsvarande en drifttemperatur, och ha olika last på varje provstav. Med minskande last erhålls längre brottider. Typiskt utförs provserier med brottider upp till ca 10 000 timmar. Om kryptöjningen mäts upp som funktion av tiden kan data produceras som kan användas till beskrivande samband för krypförloppet. Det är vanligt att man extrapolerar resultat till lägre spänningar som motsvarar driftpåkänningar. Detta gäller ofta även för beräkningsvärden för krypdimensionering. Sådana extrapolationer baserar sig på underlag av ett stort antal prover. Vid provning med konstant temperatur måste man vara speciellt uppmärksam på att det inom det spänningsintervall som provas kan förekomma olika deformationsmekanismer.

En annan vanlig metod är att prova en serie vid konstant spänning motsvarande en spänning i drift med olika temperatur för varje provstav och extrapolera brottiderna till drifttemperaturer. Denna metod, som kallas isostress-metoden, kan för många material utföras inom områden där samma deformationsmekanismer råder vilket möjliggör rättframma extrapolationer. Figur 1.7–11 ger ett exempel på resultat av isostress-provning av material från en ånglåda av 2.25Cr1Mo stål med ca 200 000 timmars drifttid vid 530°C. Provningen utfördes vid 80 MPa med temperaturer ned till 565°C. Brottiderna har plottats på en logaritmerad skala mot provtemperaturen och en linjär anpassning har extrapolerats mot lägre temperaturer. Vid drifttemperaturen, 530°C, indikeras en brottid på ca 40 000 timmar.



**Figur 1.7–11.** Resultat av isostress-kryppprovning för ett läglegerat stål efter drift vid 530°C i ca 200 000 timmar.

**Figure 1.7–11.** Isostress creep test results of a low alloy steel with approximately 200 000 hours service-exposure at 530°C.

Isostress-metoden har stor användning för bestämning av återstående livslängd av driftpåkännt material. De data som produceras vid provningen ger dock inte samma möjligheter till att utforma beskrivande samband för krypförlopp som vid provning med konstant temperatur. Töjningsmätning kan därför tyckas vara onödig för vissa ändamål av isostress-provning och utesluts inte sällan. Andra anledningar till att töjningsmätningen utesluts är att den är förknippad med högre kostnader eller att utrustning saknas. För god kontroll över provningen rekommenderas att töjningsmätning utförs. Dessutom finns andra attraktiva utvärderingsmetoder än i exemplet ovan där töjningsmätning är nödvändig.

Isostress-provning kan innebära att prover utförs ovanför materialets skalningstemperatur. Vid provning av driftpåkännt material används ofta minatyrprovstavar. För båda dessa situationer måste oxidationens inverkan på resultaten särskilt uppmärksammas och skydd mot oxidationen kan vara nödvändigt. Provning i skyddsgas är vanligt förekommande. Användande av en skyddande

beläggning, till exempel av rent nickel som pläteras på provstaven, kan vara ett alternativ. Krav som bör ställas på isostress-provningens omfattning är:

- i) En provserie med 5-7 godkända prover. Det rekommenderas att ta ut tillräckligt med material så att några reservprovstavar kan tillverkas.
- ii) En kortaste brottid på minst ca 10 timmar.
- iii) En längsta brottid på minst ca 1000 timmar.
- iv) Brottider i ett intervall som omfattar minst två tidslogaritmer.

En detaljerad översikt på isostress-provning som omfattar särskild hänsyn till användningen av miniatyrprovstavar ges i slutrapporten för Nordtest projekt 1035-92 (Borggreen 1994).

Ofta vill man göra en bedömning av den återstående livslängden i svetsar där den värmepåverkade zonen vanligen är kritisk. Ett vanligt förfarande är att ta ut en enaxlig provstav tvärs svetsen (cross-weld) som omfattar grundmaterial, värmepåverkad zon och svetsmaterial. Detta innebär att "metallurgiska notchar" uppstår som fordrar speciella analyser. Dessutom måste effekter av skillnader i provstavens och komponentens spänningstillstånd speciellt uppmärksammas. För att kunna tolka resultaten riktigt fordras att både grundmaterialet *och svetsmaterialet* även provas separat.

Varken svenska eller utländska standarder tar hänsyn till provning av svetsar och behandlar inte heller isostress-provning eller provning med miniatyrprovstavar. Svenska standarder med europabeteckning är under införande.

#### REFERENSER

Borggreen K. & Storesund J. 1994. Remnant life assessment by use of miniature creep test specimens, Final report for Nordtest Project 1035-92.

### 1.7.8 Hårdhetsprovning

Ett materials hårdhet är dess motstånd mot intryck från andra (hårdare) kroppar. En stel kropp förs in i materialet med en maxlast,  $P$ . Efter avlastning mäts det kvarstående intryckets projicerade area,  $A_p$ , och materialets hårdhet definieras som

$$H = P/A_p \quad (1)$$

Hårdheten kan betecknas som en materialparameter i sig men eftersom provningen är relativt snabb och billig att genomföra finns det ofta en strävan att kunna relatera hårdhetsvärden till andra mekaniska egenskaper. Ungefärliga samband med brottgränsen har en etablerad användning. Försök att finna samband med andra mekaniska egenskaper har oftast visat sig vara mindre framgångsrika. Hårdheten utgör dock ett komplement till annan provning och kan i många fall, men inte i generella termer, användas som en delindikation på andra mekaniska egenskaper.

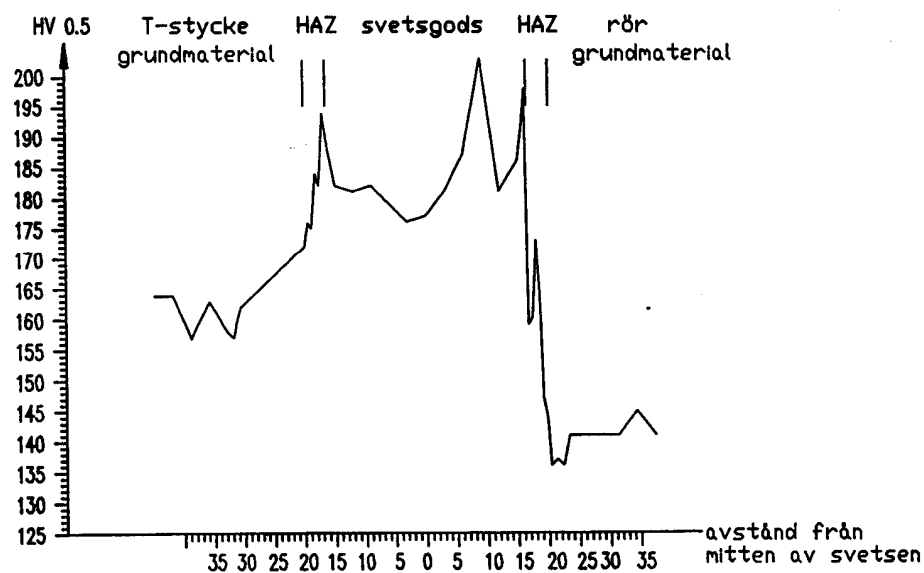
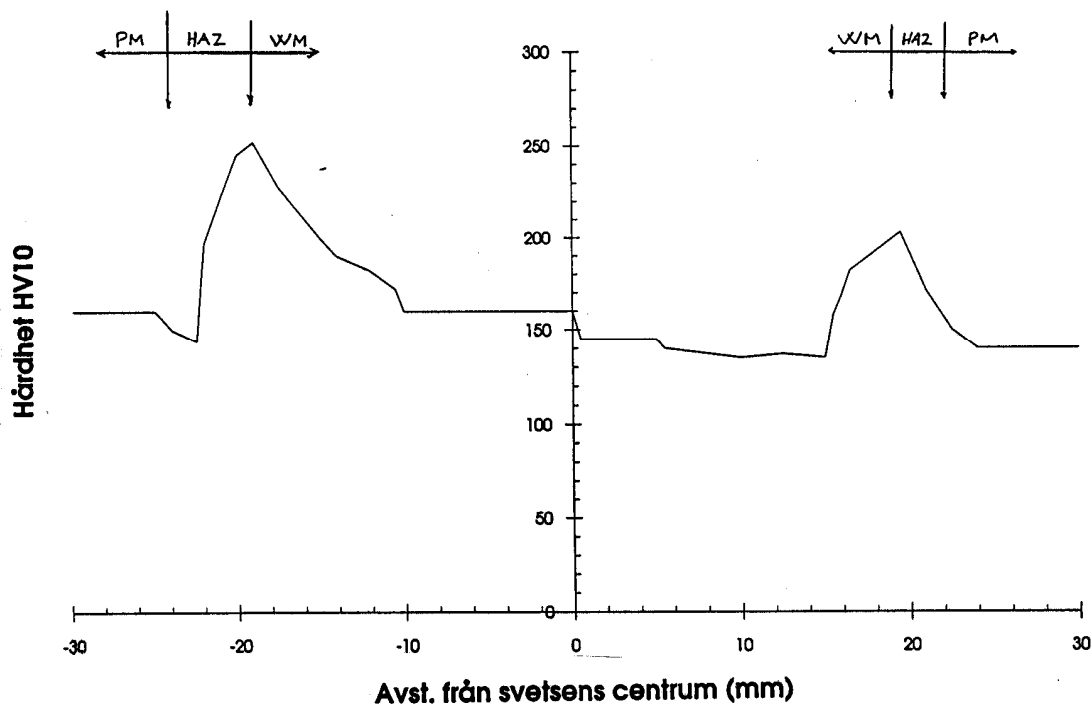
Provningen kan grupperas i:

- i) kulintryckning, där Brinell (HB) är den vanligaste. Rockwell är en annan metod som kan utföras i flera olika skalor. Rockwell C (HRC) är vanligt använd.
- ii) skarpa intryck, där Vickers (HV) är dominerande och Knoop (HK) är en annan vanlig typ. Skillnaden mellan olika typer av skarpa intryck ligger i geometrin av den diamantspets som trycks in i materialet.

Kulintryckning kan med större tillförlitlighet användas till att bestämma relevanta materialparametrar än skarpa intryck. Detta beror på att provet ger relativt väldefinierade elastiska och plastiska deformationer. Skarpa intryck har dock ett större användningsområde. Provning av keramiska material och mätning av hårdhetsvariationer i mikrostrukturen är exempel på tillämpningar där kulintryckning är mindre lämplig.

En lägre last medför ett mindre intryck vilket i sin tur innebär att lokala variationer kan mätas, till exempel vid en uppkolad yta eller i den värmepåverkade zonen i en svets. Man talar då om mikrohardhetsprovning. Hårdhet i Vickers, där en pyramidformad diamantspets trycks in och intryckets diametrar mäts i ett anslutande mikroskop, har här en stor användning. Hårdhets värdet kan påverkas av lastens storlek och den tid som maxlasten verkar, vilka därför skall anges i provresultaten. Jämförs resultaten mellan olika laster kan både stora skillnader och god överensstämmelse erhållas. Detta beror på att materialet till olika stor grad kan ha olika beståndsdelar i mikrostrukturen som kan inbegripa variation i hårdhet och fördelning. Provresultatet representerar medelvärde av de olika hårdheterna under intrycket. För många provningsändamål är det lämpligt att bestämma hårdheten från ett medelvärde av flera mätningar. Omsorgsfull preparering och injustering av prover är en förutsättning för att relevanta resultat skall erhållas. Figur 1.7-12 visar två exempel på hur hårdheten fördelar sig i profil i svetsgods (WM), över den värmepåverkade zonen (HAZ) och till grundmaterial (PM) i rörsvetsar efter ca 100 000 timmars kryppåkning. I det första fallet är hårdheten förhöjd i HAZ och på lika nivå i de båda grundmaterialen. I svetsgodset sjunker hårdheten intill HAZ och i dess mitt är den på samma nivå som grundmaterialens. I det andra fallet är hårdheten högst i svetsmaterialet och sjunker i HAZ. Hårdheten är inte lika i de båda grundmaterialen.

I svensk standard finns riktlinjer för Brinell-, Rockwell- och Vickersprovning samt kontroll av metodernas utrustning.



Figur 1.7-12. Hårdhetsprofiler tvärs två driftpåkända svetsar av låglegerade stål.

Figure 1.7-12. Hardness profiles across two service-exposed low alloy steel weldments.

### 1.7.9 Termisk utmattningsprovning

Termisk utmattningshållfasthet provas framför allt med följande metoder:

- i) lågcykelutmattning (LCF)
- ii) termomekanisk utmattning (TMF)

LCF-provning utförs med mekanisk cykling vid konstant temperatur. Den mekaniska cyklingen är oftast töjningsstyrd vilket innebär att varje cykel har samma töjningsomfång och den erforderliga lasten får rätta sig efter det. Vanligen omfattar cykeln lika stor drag- och trycktöjning. Detta motsvarar inte exakt de deformationsförlopp som en termisk cykel innebär vilket diskuteras närmare i [avsnitt 1.5.1.3 Termisk utmattning](#). Provningen utförs med servo-hydrauliska maskiner på enaxliga provstavar som omsluts av en ugn. Med utrustning som till exempel extensometrar, till vilka töjningsgivare ansluts, samt en lastcell kan spännings- och töjningsförloppet under en cykel registreras. Eventuella förändringar i materialets egenskaper under provningens gång och sprickinitiering avspeglar sig i spännings- och töjningsförloppet för en cykel.

LCF-egenskaperna karaktäriseras främst genom att prova en serie med olika töjningsomfång till brott eller sprickinitiering, se [Figur 1.5-3 i avsnitt 1.5.1.2](#). Det finns flera definitioner av antalet cykler till sprickinitiering. Använd definition av provstavens livslängd måste därför uppmärksammas vid jämförelser av olika resultat. Den töjningshastighet provningen ställs in på inverkar på resultaten. Med lägre töjningshastighet ges större bidrag av krypdeformationer under provningen vilket ofta resulterar i ett lägre antal cykler till brott. En hålltid kan också införas till varje cykel vilket resulterar i kryprelaxationer och reducerad livslängd av provet. Även detta diskuteras närmare i [avsnitt 1.5.1.3 Termisk utmattning](#) och även i [avsnitt 1.5.1.4 Kryputmattning](#).

TMF-provning utförs med samtidig mekanisk och termisk cykling, se vidare [avsnitt 1.5.1.3](#). Den termiska cyklingen kan tillföras provstaven induktivt med en spole runt denna. Det finns två varianter av provningen: i fas och ur fas. I fas innebär att den maximala dragtöjningen inträffar samtidigt som den högsta temperaturen. Vid provning ur fas är temperaturen som lägst vid den maximala dragtöjningen. Detta återspeglar två vanliga situationer vid verkliga förhållanden. Det är inte helt ovanligt att ett material med relativt goda utmattningsegenskaper vid provning inom ett visst temperaturintervall i fas får relativt dåliga egenskaper när provningen utförs ur fas och vice versa.

För andra material är LCF-livslängden och TMF-livslängden, både i och ur fas ungefär desamma om temperaturen vid LCF-försöken är likadan som den högsta vid TMF-försöken. För att göra det hela än mer komplicerat kan det vara så att material som visar lika resultat då LCF jämförs med TMF vid vissa temperaturer visar olika resultat vid andra. Sådana här skillnader uppstår till exempel av instabilitet i mikrostrukturen inom vissa temperaturintervall eller ändringar i deformationsmekanismer som är temperaturberoende.

Sambanden mellan töjningsomfång och antalet cykler till brott kan beskrivas med ekvationer där även inverkan av krypdeformationer och kryprelaxeringar ingår. Materialen karaktäriseras av att bestämma materialkonstanter som ingår i



ekvationerna. För LCF- och TMF-provning finns en amerikansk standard, ASTM STP 942. Arbete med en europastandard pågår.

## 1.8 SPÄNNINGS- OCH BROTTMEKANISKA ANALYSER

Vid dimensionering av en konstruktion eftersträvas tillfredsställande säkerhet mot haveri under konstruktionens tekniska livslängd. Det primära skälet är att man önskar undvika olyckor med risk för personskador och skador på egendom. Undvikande av kostsamma oplanerade stopp är ett annat skäl till att funktionsdugliga konstruktioner med tillfredsställande säkerhet eftersträvas.

De dimensioneringskriterier som dimensioneringsarbetet baseras på styrs av de haverimekanismer och de skademekanismer som kan vara aktuella. Ibland krävs även att deformationer är begränsade av funktionsskäl. Beroende på komponent och tillämpning påverkas således utformningen av de dimensioneringskriterier som är tillämpliga. För exempelvis en defektfri cylindrisk mantel som är utsatt för ett inre tryck är det i första hand haverimekanismen plastisk kollaps som beaktas vid dimensioneringen. Detta görs genom att tillåten membranspänning tillåts uppgå till materialets sträckgräns vid aktuell temperatur dividerad med en säkerhetsfaktor som normalt väljs till 1.5. Om samma mantel istället utsätts för ett yttre tryck måste även risken för buckling beaktas. I detta fall tillåts pålagd last uppgå till den last som leder till buckling dividerad med en säkerhetsfaktor på normalt 2.0. Typen av skademekanism påverkar också dimensioneringskriterierna. I fallet utmattning används normalt en säkerhetsfaktor 2.0 på den spänning som leder till utmattningsbrott medan i fallet krypning används, beroende på val av dimensionerad livslängd, en säkerhetsfaktor 1.25, 1.35 eller 1.5 på den membranspänning som leder till krypbrott vid den tid som komponenten är dimensionerad för.

Säkerheten mot haveri ska vara betryggande under konstruktionens hela tekniska livslängd. Detta innebär att minst samma säkerhetsnivå som tillämpas vid dimensionering av en konstruktion också ska tillämpas vid bedömning av dess tillstånd eller dess återstående livslängd. Hur "överföringen" av säkerhetsnivån ska ske är dock inte alltid självklar utan får hanteras från fall till fall.

Vid bedömning av en konstruktions hållfasthet finns det i princip två metoder att tillgå vad avser uppkomst av brott och andra skador i konstruktionen. Den första metoden brukar betecknas "klassisk metod" och baseras på beräknade spänningar och töjningar i den belastade konstruktionen. Konstruktionen antas vara defektfri och utvärdering sker mot tillämpliga spännings- eller töjningskriterier. Den andra metoden baseras på brottmekaniska principer där verkliga eller antagna defekter beaktas vid bedömning av konstruktionens integritet.

Syftet med detta kapitel är att ge en övergripande bild av områdena spänningsanalys och brottmekanik och vidare redogöra för hur dessa tekniker kan användas för hållfasthetstekniska analyser och bedömningar av belastade konstruktioner. Det är viktigt att här poängtera att spännings- och brottmekaniska analyser inte bör göras utan specialistkompetens och att det inte är möjligt att göra egna analyser i praktiska fall endast med hjälp av detta kapitel.

### 1.8.1 Spänningsanalyser

#### 1.8.1.1 Allmänt

Spänningarna i ett material är ett mått på hur mycket materialet deformeras elastiskt. I det enkla fallet att en stång är dragen i sin axialriktning (med måttlig belastning) kan spänningen i stången relateras till töjningen enligt Hooke's lag:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (1.8.1-1)$$

där  $\sigma$  är spänningen i stången,  $E$  är materialets elasticitetsmodul och  $\varepsilon$  är töjningen (deformationen) i stångens axialriktning p.g.a. pålagd kraft. Spänningen i ekvation (1.8.1-1) är vad man brukar kalla enaxlig, d.v.s. spänningarna vinkelrätt stångens axialriktning är noll. Vid mer komplexa geometrier och/eller belastningsfall övergår spänningstillståndet från att vara enaxligt till att bli fleraxligt. Sambandet (1.8.1-1) beskriver materialets respons vid måttliga laster. Vid högre belastning krävs andra beskrivningar av materialets beteende, beaktande exempelvis plasticering.

De vanligast förekommande lasterna som ger upphov till spänningar är:

- Gas- eller vätsketryck från inneslutet medium.
- Egenvikt.
- Övriga mekaniska laster.
- Förhindrad termisk utvidgning.
- Temperaturgradienter.

Inre spänningar i form av svetsegenspänningar eller andra kvarvarande (residual) spänningar kan också påverka en konstruktions funktionssäkerhet/säkerhetsmarginal. En last kan vidare vara statisk (tidsberoende), kvasistatisk (dynamisk last som genom sin natur kan betraktas som statisk) eller dynamisk (transient, periodisk eller stokastisk). Dynamiska laster kan exempelvis vara flödesinducerade laster, vindlaster samt laster p.g.a. roterande maskiner, vätskeslag, jordbävningar och explosioner.

Belastningen på en struktur kan beskrivas som antingen föreskrivna krafter eller föreskrivna deformationer som verkar på strukturen. Man talar här vanligen om att belastningen är kraftstyrd respektive deformationsstyrd. Distinktionen mellan kraft- och deformationsstyrd belastning är väsentlig vad gäller en strukturs respons. Kraftstyrda belastningar är vanligtvis allvarigare för strukturens hållfasthet då påkänningen i strukturen inte avtar då strukturen deformeras. För deformationsstyrda belastningar, som leder till kvarstående deformationer, är uppkomna påkänningar vanligen själv-begränsande.

En spänningsanalys kan utföras antingen med en linjär (elastisk) eller en icke linjär materialmodell. I flertalet fall är det fullt tillräckligt att enbart genomföra en linjärelastisk spänningsanalys vid dimensionering av en konstruktion eller vid bedömning av dess hållfasthet. I vissa fall kan det dock bli aktuellt att genomföra spänningsanalyser med en icke linjär materialmodell då fenomen som exempelvis plasticering eller krypning mera i detalj måste studeras. Det bör noteras att tillvägagångssättet vid utvärdering av resultat från dessa två typer av spänningsanalys normalt skiljer sig åt.

Första steget i en spänningsanalys är att genom en idealisering av verkligheten skapa en abstrakt modell av den struktur man avser att analysera. Modellens utformning påverkas av en mängd faktorer såsom:

- Vilka haverimekanismer som måste beaktas.
- Vilka skademekanismer som måste beaktas.
- Hur stor del av strukturen som måste beaktas.
- Vilken materialmodell som krävs.
- Vilka laster och randvillkor som måste beaktas.
- Hur laster och randvillkor ska appliceras på modellen.
- Vilka lastfall som måste beaktas.

Exempelvis kan en betydligt enklare modell användas i fallet att membranspänningen i en cylindrisk mantel utsatt enbart för ett inre tryck ska bestämmas jämfört med fallet att en analys av ett utmattningspåkänt ligament i en ånglåda ska genomföras.

Efter det att den teoretiska analysen och/eller de numeriska beräkningarna genomförts ska erhållna resultat tolkas och utvärderas. Tolkningen av resultaten görs ofta utgående från någon dimensioneringsnorm eller standard.

Ett viktigt delmoment i en spänningsanalys är att genomföra överslagsberäkningar av den belastade strukturens deformationer, spänningar etc. Syftet med överslagsberäkningarna är att kontrollera att erhållna resultat från spänningsanalysen verkar rimliga.

#### *1.8.1.2 Termer som relaterar till spänningsanalys*

Det finns ett flertal termer som relaterar till området spänningsanalys av vilka några kort beskrivs här nedan:

##### Nominell spänning

Spänningsnivå i konstruktionen vid förenklad modellering utan hänsyn till exempelvis detaljerad geometri som ger lokala spänningskoncentrationer.

##### Spänningskoncentration

Geometrisk diskontinuiteter eller materialdiskontinuiteter kan leda till en koncentration av spänningar, d.v.s. att spänningen lokalt blir högre än den nominella. En spänningskoncentration påverkar direkt toppspänningen och kan exempelvis innebära att risk för utmattningsbrott föreligger.

##### Plastisk analys

Konstruktionens respons analyseras under beaktande av materialets plastiska egenskaper. Plastisk deformation är sådan deformation som kvarstår efter avlastning av konstruktionen. Töjningshårdnande och den omfördelning av spänningar som sker vid plasticering inkluderas i analysen. Se hårdnande elastiskt-plastiskt material nedan.

##### Plastisk analys - kollapslast

Kollapslasten för en konstruktion bestäms genom plastisk analys av konstruktionen. Vid kollapslasten ökar deformationen obegränsat vid en liten lastökning. Materialets plastiska egenskaper beskrivs med ett flytvillkor och en flyttag.

### Gränslastanalys

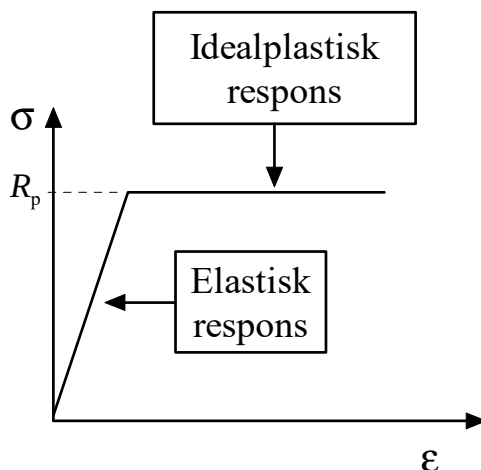
Gränslastanalys är ett specialfall av plastisk-kollapslastanalys där materialets egenskaper antas vara elastiskt idealplastiskt. Om skademekanismen krypning existerar ska denna beaktas. Se elastiskt idealplastiskt material nedan.

### Gränslast

Den last i gränslastanalysen som leder till plastisk kollaps hos konstruktionen.

### Elastiskt idealplastiskt material

Responsen hos ett elastiskt idealplastiskt material framgår av Figur 1.8.1-1. Vid pålastning av en provstav gäller under den elastiska fasen Hookes lag, d.v.s. spänningen är direkt proportionell mot töjningen. Vid avlastning i detta område återgår all deformation. När sträckgränsen  $R_p$  uppnåtts är obegränsat stor deformation möjlig.

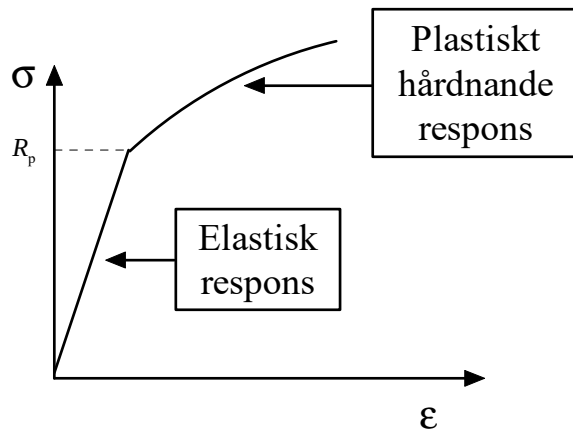


**Figur 1.8.1-1** Respons hos ett elastiskt idealplastiskt material.

**Figure 1.8.1-1** Response of an elastic ideally plastic material.

### Hårdnande elastiskt-plastiskt material

Responsen hos ett hårdnande elastiskt-plastiskt material framgår av Figur 1.8.1-2. Vid pålastning av en provstav gäller under den elastiska fasen Hookes lag, d.v.s. spänningen är direkt proportionell mot töjningen. När materialet belastas över sträckgränsen kommer, till skillnad från fallet elastiskt idealplastiskt material, ett plastiskt hårdnande erhållas efterhand belastningen ökar.



**Figur 1.8.1-2** Respons hos ett hårdnande elastiskt plastiskt material.

**Figure 1.8.1-2** Response of a hardening elastic plastic material.

#### 1.8.1.3 Spänningsklassificering

I dimensioneringssammanhang är det vanligt att man skiljer på primär spänning, sekundär spänning och toppspänning [Tryckkärlsnormer 1987]. Genom denna indelning kan man normalt basera dimensioneringsarbetet på resultat erhållna från linjärt elastiska spänningsanalyser. Detta är att föredra då motsvarande icke linjära spänningsanalys är betydligt mera komplex både vad gäller genomförande och utvärdering av resultat. Vad som karakteriserar de tre typerna av spänning kan sammanfattas enligt följande:

##### Primär spänning:

Normal- eller skjuvspänning som orsakas av pålagda yttre krafter eller moment (normalt kraftstyrda) och som är nödvändiga för upprätthållande av jämviktsvillkoren.

En primär spänning karakteriseras av att den inte är självbegränsande, d.v.s. om sträckgränsen överskrids erhålls kollaps eller åtminstone stora deformationer.

Exempel på primära spänningar är membranspänning i en cylindrisk mantel på grund av ett inre tryck och böjspänning i mitten av en plan gavel till följd av ett yttryck.

##### Sekundär spänning:

Normal- eller skjuvspänning till följd av deformationsbegränsningar inbyggda i strukturen eller förorsakade av infästningar eller närliggande delar. Motsvarande laster betecknas normalt för deformationsstyrda laster.

En sekundär spänning karakteriseras av att den är självbegränsande, d.v.s. lokal plastisk deformation medför att spänningen begränsas.

Kollaps på grund av att den sekundära spänningen uppstått en gång är inte trolig.

Exempel på sekundära spänningar är termiska spänningar till följd av förhindrad expansion och böjspänning vid stora diskontinuiteter.

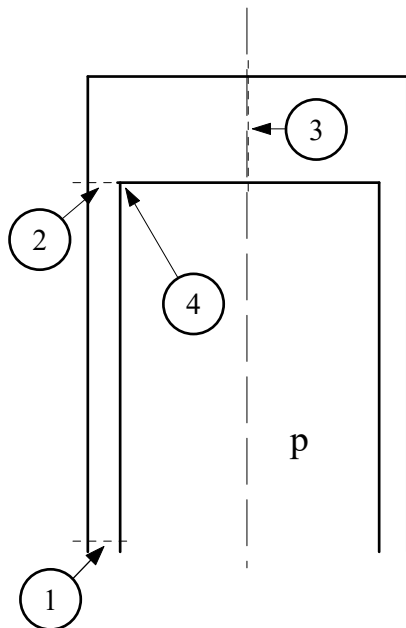
Toppspanning:

Generellt varierar spänningen över ett tvärsnitt genom en kropp. Den varierande spänningen brukar delas upp i en konstant del (membranspänning) och en del som varierar linjärt över tvärsnittet (böjspänning). Toppspanning är tillskottet till membran- plus böjspänningar, t.ex. på grund av lokala diskontinuiteter eller lokala termiska spänningar. Utmärkande för denna spänningsklass är att den inte ger nämnvärda deformationer eller formförändringar. Däremot kan toppspänningen exempelvis bidra till initiering och tillväxt av utmattningssprickor eller sprödbrott.

En aspekt som är viktig att notera är att olika typer av spänningar har olika inverkan på en specifik konstruktion beroende på skade- och haverimekanism. I fall då de haverimekanismer som påverkas av toppspänningen, exempelvis utmattning och miljöbetingad sprickbildning, inte behöver beaktas, innebär höga toppspänningar ingen begränsning för konstruktionens integritet och livslängd. En hög lokal spänning behöver således inte alltid innebära att en konstruktions livslängd förkortas.

Exempel

Studera ett cylindriskt tryckkärl med en plan gavel utsatt för ett inre tryck  $p$  enligt Figur 1.8.1-3 och klassificera spänningarna vid de tre snitten 1 - 3 och i punkten 4.



Figur 1.8.1-3 Cylindriskt tryckkärl med plan gavel utsatt för inre tryck,  $p$ .

Figure 1.8.1-3 Cylindrical pressure vessel with flat head subjected to an internal pressure,  $p$ .

Snitt 1 går genom en ostörd del av den cylindriska manteln. Ett membranspännings-tillstånd råder i både omkretsled och axialled. Spänningarna klassificeras som allmän primär membranspänning då dessa inte är självbegränsande, dvs om sträckgränsen överskrids erhålls kollaps eller åtminstone stora deformationer.

Snitt 2 går genom manteln vid övergången till den plana gaveln. Förutom membranspänningar förekommer här böjspänningar över vägg tjockleken på grund av

den geometriska diskontinuiteten. Dessa böjspänningar klassificeras som sekundära då de är självbegränsande, dvs lokal plastisk deformation medför att spänningen begränsas.

Snitt 3 går genom centrum på den plana gaveln. Snittet är väsentligen utsatt för böjspänningar på grund av det inre trycket. Böjspänningarna klassificeras som primära då spänning inte är självbegränsande, dvs om sträckgränsen överskrids erhålls kollaps eller åtminstone stora deformationer.

Med punkt 4 avses mantelns inneryta vid övergången till den plana gaveln. Indelning av spänningarna i punkt 4 ger både membranspänningar, böjspänningar och toppspänningar (se snitt 2 ovan). Toppspänningarna orsakas av spänningskoncentrationen vid hörnet mellan mantel och gavel.

#### 1.8.1.4 Spänningskriterier och säkerhetsmarginaler

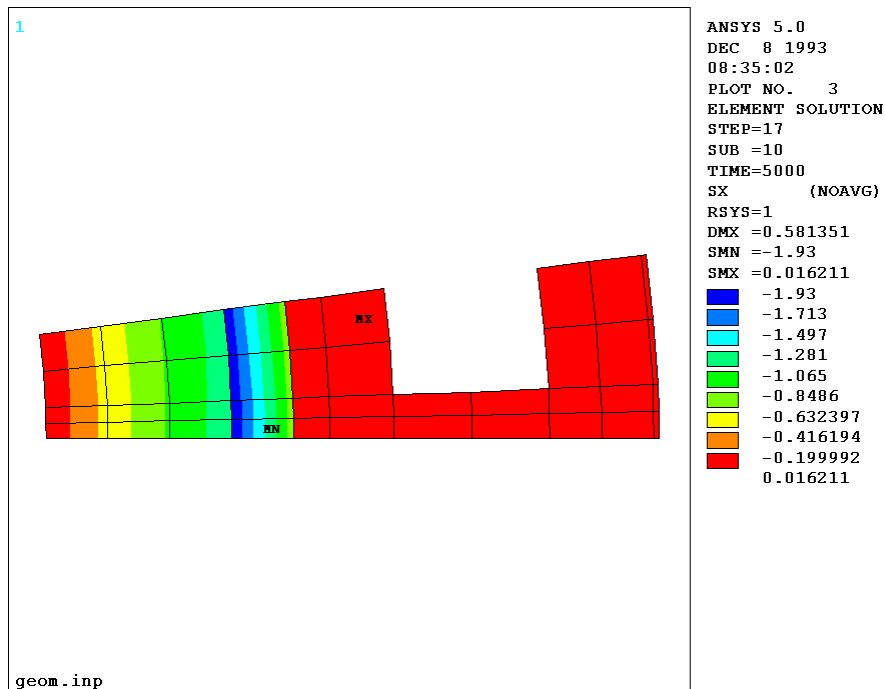
Med ett spänningskriterium avses normalt en gräns för maximalt tillåten spänning där karaktären på studerad spänning är kopplad till en specifik haverimekanism. Tanken är att uppfyllandet av spänningskriteriet ska ge betryggande säkerhet mot haveri med avseende på den specifika haverimekanismen. Spänningskriteriet involverar normalt en säkerhetsfaktor. Denna väljs så att betryggande säkerhetsmarginal avseende spridning i belastning, materialegenskaper, tillverkningsfel, etc. erhålls. Ofta anges nödvändiga säkerhetsfaktorer i normer och standarder. Exempel på spänningskriterium är att primära spänningar vanligen får uppgå till högst 2/3 av materialets sträckgräns vid aktuell temperatur för att säkerställa att plastisk kollaps undviks. På samma sätt finns det spänningskriterier för erhållande av tillfredsställande säkerhet mot exempelvis stora deformationer och instabilitet.

Kopplingen mellan spänningsklassificering och spänningskriterier är viktig och framgår vanligen i normer och standarder för dimensionering. I exempelvis Tryckkärlsnormer 1987, kapitel 37, anges spänningskriterier för tre typer av primär spänning (allmän membranspänning, lokal membranspänning, böjspänning) och primär plus sekundär membran + böjspänning. I fall då utmattning är aktuell ska även toppspänningen med tillhörande kriterium beaktas. Haveri genom brott undviks genom att enbart material med segt beteende tillåts.

#### 1.8.1.5 Finita elementanalyser

Finita elementmetoden (FEM) är en datoranpassad beräkningsmetod för att bestämma exempelvis spänningar i en struktur. En modell skapas i datorn av hela eller delar av den struktur man avser att analysera. Modellen delas in i ändligt stora element där elementen är kopplade till varandra genom noder, se Figur 1.8.1-4.





Figur 1.8.1-4 Exempel på en FE-modell av ett skivsegment.

Figure 1.8.1-4 Example of an FE model of a disk segment.

Elementen tilldelas materialegenskaper och aktuella laster samt randvillkor appliceras i modellen. Därefter löses det uppställda problemet numeriskt med hjälp av datorn och information erhålls om exempelvis reaktionskrafter där modellen är låst, förskjutningar i noder som inte är låsta samt spänningar och töjningar i de olika elementen. I områden där studerade storheter varierar mycket görs elementindelningen finare för att lösa upp exempelvis spänningsgradienterna. Metodiken kan också användas till hjälp för brottmekanisk analys av sprickor.

Vid byggandet av en FE-modell såväl som vid utvärdering av resultat från motsvarande FE-analys är det viktigt att ha en insikt om vilka storheter som är relevanta för analysen av konstruktionens hållfasthet. Beroende på vilka kriterier utvärderingen ska göras mot påverkas exempelvis hur stor del av strukturen som måste tas med i modellen, hur elementindelningen ska se ut, hur lasterna ska appliceras, hur randvillkor ska föras in och vilken materialmodell som ska användas. Om exempelvis återstående livslängd ska bestämmas för en utmattningspåkänd konstruktion måste elementindelningen vara tillräckligt fin i de områden där utvärderingen ska göras så att lokala spännings-koncentrationer fångas upp.

Att FE-beräkningar idag är så vanligt förekommande inom industrin förklaras framförallt av den snabba utvecklingen av datorprestandan. Samma FE-problem som för 10 år sedan krävde en superdator för att kunna lösas kan idag analyseras med en ordinär persondator. Tillgänglighet på datorkraft är således inte begränsande längre. En annan bidragande orsak till att FE-beräkningar idag ofta används är att komplexa geometrier, komplexa materialmodeller, komplexa laster och komplexa randvillkor relativt enkelt kan hanteras. Utan FE-tekniken skulle många problem vara i stort sett omöjliga att analysera.

### 1.8.1.6 Töjningsmätning

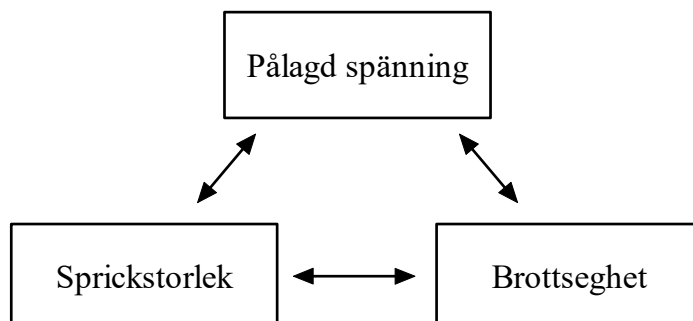
Ett alternativt sätt att bestämma spänningarna i en konstruktion är att utgående från uppmätta töjningar och med kännedom om materialets elasticitetsmodul beräkna spänningarna. Ett flertal experimentella metoder för att mäta töjning (deformation) finns. Vissa ger "punktvis" information, andra ger information om töjningen över ett större område. Av använda tekniker är mätning med hjälp av trådtöjningsgivare den mest beprövade och vanligast förekommande. Tekniken bygger på att en tråds elektriska resistans förändras då den deformeras. Genom att klistra fast givaren i den punkt på komponenten där man önskar bestämma spänningen kan man genom att mäta förändringen i givarens resistans, då komponenten belastas, bestämma töjningen och därmed också beräkna spänningen.

Ett flertal trådtöjningsgivare med olika konfiguration finns tillgängliga för mätning i en eller flera riktningar. I fallet att töjningsfältets utseende är oklart och man därigenom inte vet i vilken riktning man ska mäta är det vanligt att så kallade rosettgivare nyttjas. Dessa givare känner av töjningen i vanligtvis tre riktningar vilket ger möjlighet att bestämma töjningstillståndet i samtliga riktningar för den position på ytan givaren är placerad. Storleken på givaren begränsar möjligheten att bestämma spänningen lokalt. För att bestämma spänningen i en "punkt" ska givaren vara så liten som möjligt. För bestämning av restspänningar borras ett hål intill rosettgivaren.

De trådtöjningsgivare som beskrivits ovan kan normalt används upp till temperaturer kring 150 °C. För mätning av töjningar på högtemperaturkomponenter som arbetar i temperaturintervallet 500-540 °C, har mätning med hjälp av påsvetsade kapacitiva givare varit fruktbara. Kostnaden för denna typ av mätning är dock betydligt högre.

### 1.8.2 Brottmekaniska analyser

Brottmekanik är den del av hållfasthetsläran som behandlar vilka konsekvenser större materialdefekter (slagstråk, svetsfel, driftinducerade defekter, etc.) kan få för en konstruktions hållfasthet. Det brottmekaniska konceptet baseras väsentligen på de tre variablerna pålagd spänning, sprickstorlek och brottseghet där syftet med den brottmekaniska analysen är att kvantifiera den kritiska kombinationen av dessa tre variabler, se Figur 1.8.2-1.



Figur 1.8.2-1 De tre väsentliga variablerna inom brottmekaniken.

Figure 1.8.2-1 The three essential variables in fracture mechanics.

Utvecklingen av den moderna brottmekaniken tog fart efter andra världskriget. Orsaken till den ökade aktiviteten inom området var att man sökte en förklaring till varför ett flertal helsvetsade transportfartyg, vid namn Liberty, under andra världskriget bröts av på mitten under normal transport. Forskningen visade att framförallt tre orsaker förklarade det inträffade: i) svetsarna innehöll sprickliknande defekter från tillverkningen, ii) flertalet brott startade vid hörn med hög spänningskoncentration och iii) materialet hade låg seghet.

Drivkraften för fortsatta utveckling inom området kom därefter från flyg-, offshore och framförallt från kärnkraftindustrin, i strävan att kunna uppnå säker drift. Forskningen inom brottmekanikområdet har varit intensiv och idag är tillämpningarna många. Exempel på användning är:

- På designstadiet kan brottmekaniska analyser ge underlag för konstruktionsutformning, val av produktionsmetod och val av tillverkningskontroll. En konstruktion kan också utformas med planerade återkommande provningar där provningsintervallet beräknats med brottmekaniska metoder.
- Vi påträffande av en defekt i en komponent kan brottmekanisk analys nyttjas för att bedöma om defekten med betryggande säkerhet kan lämnas kvar utan åtgärd till nästa inspektion, om belastningen måste reduceras eller om en reparation är nödvändig.
- Brottmekanik kan användas vid val av system för oförstörande provning och för bestämning av minsta defektstorlek som måste kunna detekteras.
- Vid bedömning av en komponents återstående livslängd ger brottmekaniken svar på hur stora defekter som, med tillfredsställande säkerhetsmarginal, kan få förekomma i komponenten fram till nästa provning.

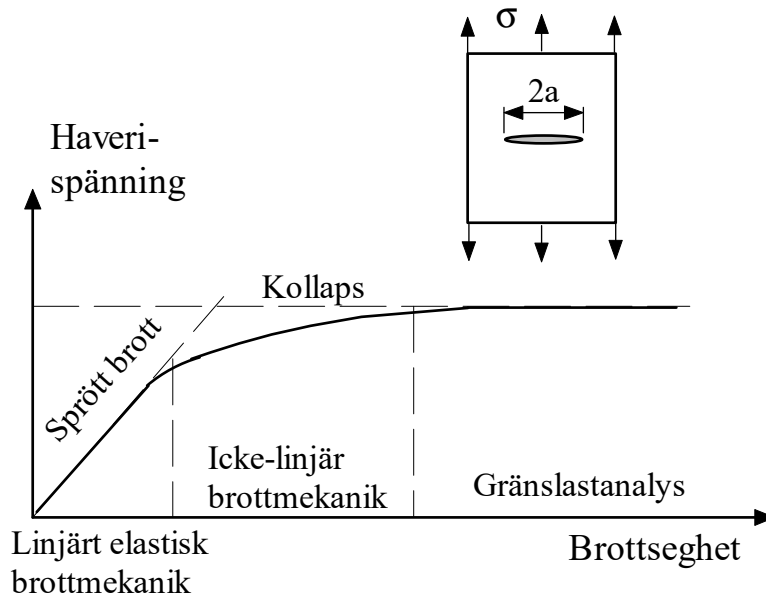
En komponents förmåga att härbärgera en defekt utan att denna tillväxer är beroende av ett flertal faktorer såsom:

- Nivå och typ av belastning.
- Komponentens geometri.
- Storlek, placering och orientering av defekt.
- Komponentens materialegenskaper.

De tre första faktorerna har direkt inverkan på spänningstillståndet kring sprickspetsen. Vid bestämning av spänningstillståndet antar man att defekten kan betraktas som en spricka. Denna betraktelse är en god approximation och alltid konservativ då en spricka är den allvarligaste defekttypen.

Beroende på ett materials förmåga att härbärgera en defekt utan att denna tillväxer, d.v.s. beroende på materialets brottseghet, kommer olika haverimekanismer att vara styrande då en komponent innehållande en spricka eller defekt pålastas tills dess att den havererar. I Figur 1.8.2-2 belastas en plåt innehållande en spricka tills dess att haveri inträffar. I figuren framgår den spänning som leder till haveri som funktion av materialets brottseghet. Om brottsegheten är låg kommer den rådande haverimekanismen att vara sprött brott och den kritiska spänningen varierar linjärt med materialets brottseghet. I detta intervall kan linjärt elastisk brottmekanik användas för att bestämma när brott kommer att ske. Om materialet har en mycket hög brottseghet gäller inte längre den linjärt elastiska brottmekaniken. Här styrs haveriet istället av materialets plastiska egenskaper. I det mellanliggande brottseghetsintervallet sker det således en övergång i haverimekanism från sprött brott under linjärt elastiska

förhållanden till plastisk kollaps. Olinjär brottmekanik ger modeller som beskriver detta område mellan linjärt elastiska brottmekanik och plastisk kollaps.

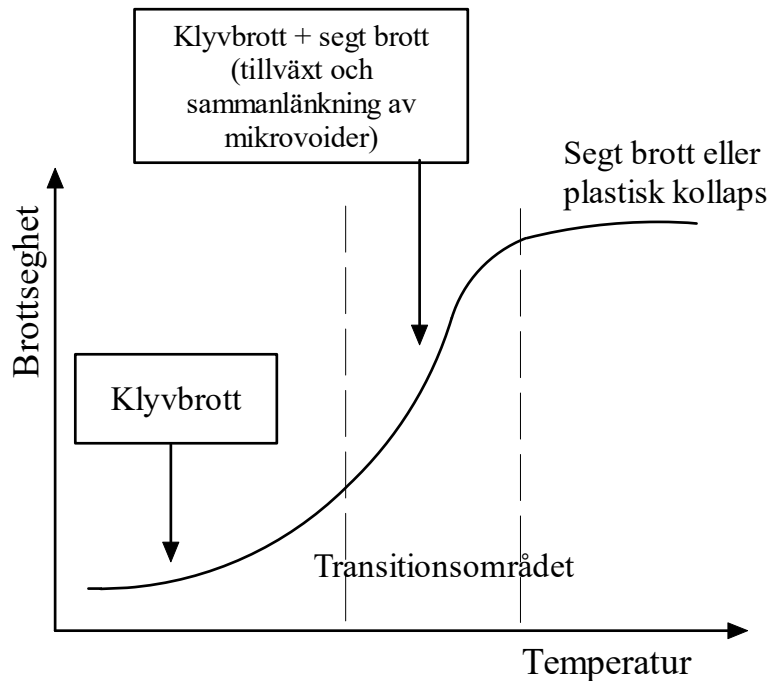


Figur 1.8.2-2 Brottseghetens inverkan på den styrande haverimekanismen.

Figure 1.8.2-2 The effect of the fracture toughness on the governing failure mechanism.

Vid provning av brottsegheten hos ferritiska stål vid olika temperaturer finner man att denna förändras drastiskt över ett litet temperaturområde kallat transitionsområdet, se Figur 1.8.2-3. Vid temperaturer lägre än transitionsområdet beter sig materialet sprött och brottet sker genom klyvning. Vid temperaturer över transitionsområdet beter sig materialet duktilt och brottet sker genom bildning och sammanväxning av så kallade mikrovöider (håligheter). Det temperaturintervall vid vilket brottet övergår från att vara sprött till att vara duktilt kan jämföras med omslagstemperaturen vid provning av slagsegheten. Dessa två temperaturer behöver dock inte sammanfalla.

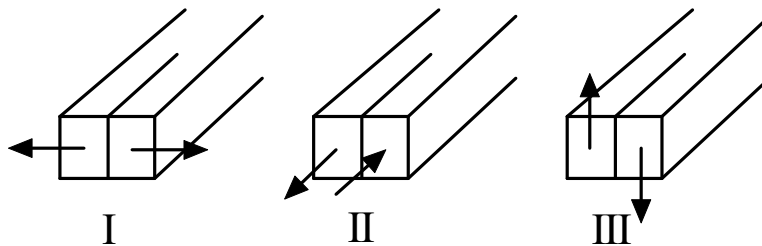
På samma sätt som för slagsegheten, kan brottsegheten för ett material påverkas av driftförhållanden (t.ex. termisk åldring eller bestrålning) och kurvan kan förskjutas mot högre temperaturer. Detta kan innebära att tryckprovning av en komponent i ferritiskt stål vid låg temperatur kan leda till brott då defekter som tidigare inte lett till någon spricktillväxt nu börjar tillväxa genom att brottsegheten vid temperaturen för tryckprovningen reducerats genom att transitionsområdet förskjutits mot en högre temperatur.



Figur 1.8.2-3 Brottmekanismer kring transitionsområdet för ferritiska stål.

Figure 1.8.2-3 Fracture mechanisms at the transition interval for ferritic steels.

Belastningen på en spricka kan indelas i tre komponenter efter det sätt på vilket sprickans två motstående ytor förskjuts relativt varandra. I Figur 1.8.2-4 redovisas de tre olika klasserna modus I, II och III. Försättningsvis kommer enbart modus I att behandlas i handboken då denna komponent, för majoriteten av alla praktiska tillämpningar, är helt styrande för spricktillväxten.



Figur 1.8.2-4 Modus I, II och III.

Figure 1.8.2-4 Modus I, II and III.

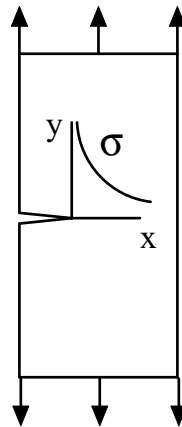
#### 1.8.2.1 Linjärt elastisk brottmekanik

Den linjärt elastiska brottmekaniken är den del av brottmekanikområdet som utvecklades först. Utgående från linjärt elastisk teori beskrivs tillståndet framför sprickspetsen entydigt av den så kallade spänningsintensitetsfaktorn,  $K_I$ . För en

sprucken plåt som är belastad med en dragspänning tvärs sprickan enligt Figur 1.8.2-5 kan spänningen framför sprickspetsen, vinkelrätt sprickas plan, skrivas som

$$\sigma(x) = K_I / \sqrt{2\pi x} \quad (1.8.2-1)$$

där  $x$  är avståndet från sprickspetsen. Av ekvation (1.8.2-1) framgår det att spänningen avtar med ett genom roten ur avståndet från sprickspetsen ( $1/\sqrt{x}$ ), att spänningen är oändligt hög vid sprickspetsen ( $x = 0$ ), och att spänningsintensitetsfaktorn  $K_I$  anger nivån på spänningsfältet.

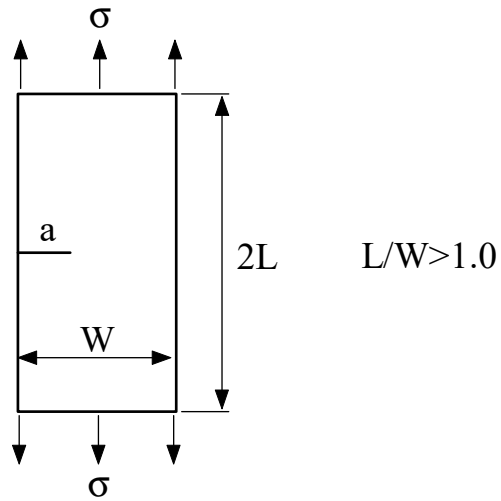


**Figur 1.8.2-5** Spänningsfält vid sprickspets.  
**Figure 1.8.2-5** Stress field ahead of crack tip.

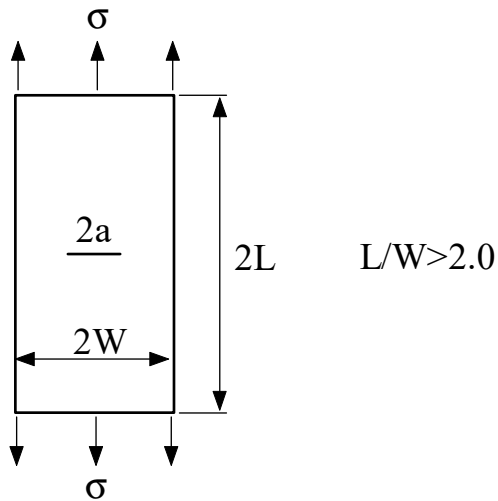
I praktiken kommer spänningen vid sprickspetsen aldrig att bli oändligt hög. Istället kommer materialet närmast sprickspetsen att plasticeras och en spänningsomlagring kommer att ske. Så länge den plastiska zonen framför sprickspetsen är tillräckligt liten kan dock den linjärt elastiska brottmekaniken användas för att bestämma tillståndet framför sprickspetsen och därigenom bedöma inverkan av sprickan.

För det allmänna fallet gäller att spänningsintensitetsfaktorn  $K_I$  beror på i) den spruckna komponentens geometri, ii) sprickans placering och storlek och iii) storlek och typ av last. Att linjär elastisk teori kan användas innebär att  $K_I$  är direkt proportionell mot pålagd last och att superpositionsprincipen gäller.

Spänningsintensitetsfaktorn  $K_I$  finns angiven för ett flertal olika anvisningar och laster i handböcker. Två exempel på  $K_I$ -lösningar ges i Tabell 1.8.2-1.

Tabell 1.8.2-1 Exempel på  $K_I$ -lösningar för två spruckna geometrier med föreskrivna dragspänningar.

$$K_I = \sigma \sqrt{2W \tan\left(\frac{\pi a}{2W}\right)} \left[ 0.752 + 2.02\left(\frac{a}{W}\right) + 0.37\left(1 - \sin\left(\frac{\pi a}{2W}\right)\right)^3 \right] / \cos\left(\frac{\pi a}{2W}\right)$$



$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a} \left[ 1 - 0.025\left(\frac{a}{W}\right)^2 + 0.06\left(\frac{a}{W}\right)^4 \right] \sqrt{1 / \left(\cos\left(\frac{\pi a}{2W}\right)\right)}$$

Enligt ekvationerna i Tabell 1.8.1-1 framgår det att spänningsintensitetsfaktorn  $K_I$  är direkt proportionell mot pålagt nominellt spänningsfält  $\sigma$ . På vilket sätt  $K_I$  varierar med sprickans storlek är beroende på komponentens geometri och sprickans placering.



För det andra fallet i Tabell 1.8.1-1 är  $K_1$  i stort sett proportionell mot roten ur spricklängden  $a$ .

### Brottvillkor

I den linjärt elastiska brottmekaniken antas spricktillväxt ske när  $K_I$  uppnår ett för materialet karakteristiskt värde kallat brottsegheten,  $K_{Ic}$ . Brottsegheten för ett material erhålls genom provning av materialet, från materialdatabanker eller genom approximativa korrelationer till materialets slagseghet.

Vid provning av brottsegheten  $K_{Ic}$  är det viktigt att vissa kriterier vad gäller provstavsgeometrin är uppfyllda. Detta för att erhålla en materialegenskap som är oberoende av provgeometrin och därigenom säkerställa överförbarhet mellan provstaven och den spruckna komponenten som ska bedömas. Enligt provningsstandarden ASTM E399 uppfylls dessa kriterier då provstavens spricklängd, dess tjocklek och dess ligament framför sprickspetsen samtliga överstiger  $2.5(K_{Ic} / R_p)^2$  där  $R_p$  är materialets sträckgräns.

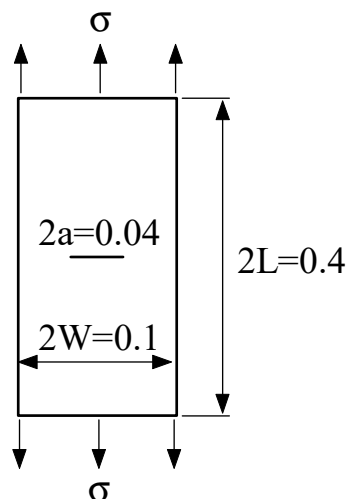
Vad gäller ett materials brottseghet brukar man ge följande tumregler:

- En ökning av sträckgränsen ger en sänkning av brottsegheten.
- En ökning av kornstorleken ger en sänkning av brottsegheten.
- En högre grad av svavel eller andra föroreningar sänker brottsegheten.
- Brottsegheten sänks pga. krypskada, radioaktiv strålning och termisk åldring.

Se vidare handbokens kapitel 1.7 om förstörande provning.

### Exempel

En grov plåt med en centralt placerad spricka är utsatt för en dragspänning enligt Figur 1.8.2-6. Materialet i plåten har en brottseghet på  $30 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ . Bestäm vid vilken nivå på dragspänningen som spricktillväxt sker genom nyttjande av linjärt elastisk brottmekanik. Samtliga mått är angivna i meter.



Figur 1.8.2-6 Plåt med centralt placerad spricka.

Figure 1.8.2-6 Centre cracked plate.

Vid spricktillväxt gäller att  $K_I = K_{Ic}$  dvs.

$$\sigma \sqrt{\pi \cdot 0.02} \left[ 1 - 0.025 \left( \frac{0.02}{0.05} \right)^2 + 0.06 \left( \frac{0.02}{0.05} \right)^4 \right] \sqrt{1 / \left( \cos \left( \frac{\pi \cdot 0.02}{2 \cdot 0.05} \right) \right)} = 30$$

(1.8.2-2)

Ur ovanstående ekvation erhålls kritisk dragspänning till

$$\sigma_{\text{kritisk}} = 120 \text{ MPa}$$

#### 1.8.2.2 Spricktillväxt på grund av utmattning - Paris lag

Vid cykliskt varierande belastningar av relativt låg nivå kan spricktillväxt till följd av utmattning uppkomma. Empiriskt har man funnit att sprickans tillväxthastighet vid utmattningsbelastning kan beskrivas med hjälp av omfånget på spänningsintensitetsfaktorn

$$\Delta K_I = K_{I,\max} - K_{I,\min}$$

(1.8.2-3)

I ett stort intervall (se figur 1.8.2-7) mellan  $\Delta K_I = \Delta K_{th}$  och  $\Delta K_{I,\max} = K_{Ic}$  råder för ett givet material och miljö ett samband av typen

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K_I)^n$$

(1.8.2-4)

där  $da/dN$  är spricktillväxt per cykel,  $C$  och  $n$  är materialkonstanter och  $\Delta K_{th}$  är tröskelvärde för omfånget på spänningsintensitetsfaktorn, d.v.s. om omfånget på spänningsintensitetsfaktorn är lägre än en viss nivå sker vanligen ingen spricktillväxt på grund av utmattning. Figur 1.8.2-7 visar spricktillväxt per cykel som funktion av omfånget på spänningsintensitetsfaktorn. Ekvation (1.8.2-4), vanligtvis betecknad Paris lag, gäller således för kurvans mittersta del.

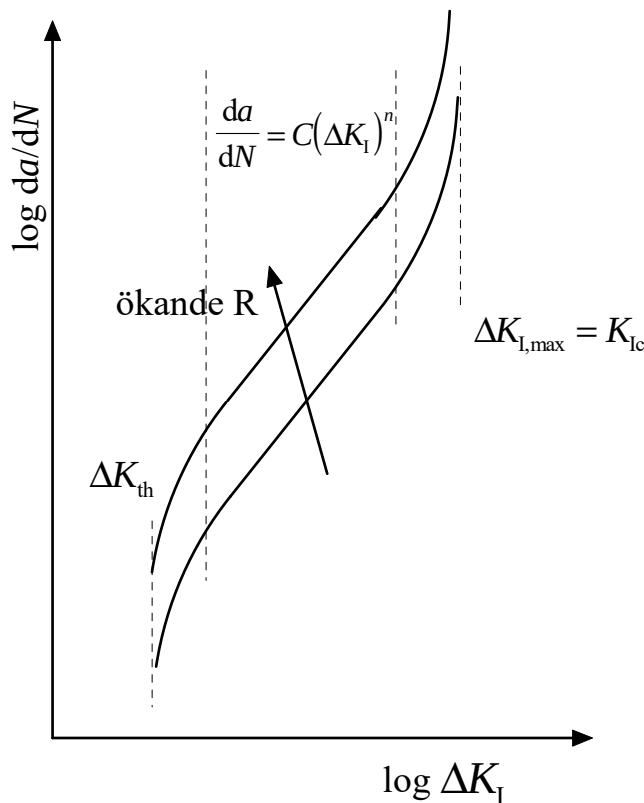
Inverkan av spänningsintensitetsförhållandet

$$R = \frac{K_{I,\min}}{K_{I,\max}}$$

(1.8.2-5)

på spricktillväxtkurvor framgår av Figur 1.8.2-7. Vid ökande  $R$  förskjuts kurvan uppåt. Beroendet av  $R$  är vanligen relativt svagt i jämförelse med beroendet av  $\Delta K_I$ . Om

$K_{I,\max} < 0$  sker normalt ingen spricktillväxt.



Figur 1.8.2-7 Spricktillväxtkurvor för utmattning.

Figure 1.8.2-7 Fatigue crack growth curves.

#### 1.8.2.3 Spricktillväxt på grund av spänningskorrosion

Spricktillväxt på grund av spänningskorrosion, eller miljöbetingad spricktillväxt, kan förekomma under vissa elektrokemiska miljöer kombinerat med konstanta yttre laster. Som för utmattning har man funnit att inverkan av mekanisk påkänning på spricktillväxthastigheten även vid spänningskorrosion kan beskrivas utgående från spänningsintensitetsfaktorn enligt

$$\frac{da}{dt} = h(K_I) \quad (1.8.2-6)$$

där  $da/dt$  är tillväxthastigheten och  $h$  är en materialfunktion som är starkt beroende av miljöbetingelserna. I fallet att utmattnings- och spänningskorrosionsprocesserna samverkar benämns spricktillväxten för korrosionsutmattning, se handbokens allmänna del.

#### 1.8.2.4 Olinjär brottmekanik

Förutsättningen för att den linjärt elastiska brottmekaniken ska vara giltig är att den plastiska zon som utvecklas närmast sprickspetsen, vid belastning av den spruckna komponenten (och provstaven), är tillräckligt liten. När så är fallet kan

spänningsintensitetsfaktorn  $K_I$  användas för att entydigt beskriva tillståndet vid sprickspetsen och vidare användas för att med kännedom om brottsegheten bedöma när spricktillväxt kommer att inträffa. När den plastiska zonen framför sprickspetsen blir av den storleksordningen att de resulterande plastiska spännings- och töjningsfälten blir styrande för brottprocessen, är förutsättningarna för den linjärt elastiska brottmekaniken inte längre uppfyllda. För att kunna hantera detta fall med segt brott har den olinjära brottmekaniken utvecklats.

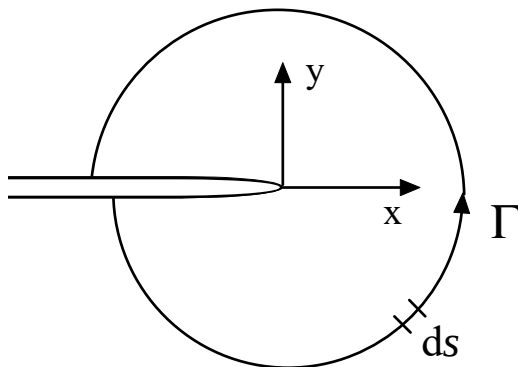
För den olinjära brottmekaniken har den så kallade J-integralen funnits vara en karakteriserande parameter för brottprocessen. J-integralen är en tvådimensionell energilinjintegral definierad enligt

$$J = \int_{\Gamma} \left( w dy - T_i \frac{\partial u_i}{\partial x} ds \right) \quad (1.8.2-7)$$

där  $\Gamma$  är linjekonturen tagen moturs runt sprickspetsen,  $T_i$  är den på linjekonturen verkande lastvektorn,  $u_i$  är den på linjekonturen verkande förskjutningsvektorn,  $ds$  är ett inkrement av linjekonturen,  $x$  och  $y$  är koordinaterna i ett kartesiskt koordinatsystem med origo vid sprickspetsen och  $w$  är töjningsenergin per volymsenhet definierad som

$$w = \int_0^{\epsilon_{ij}} \sigma_{ij} d\epsilon_{ij} \quad (1.8.2-8)$$

där  $\sigma_{ij}$  och  $\epsilon_{ij}$  är spännings- respektive töjningskomponenterna. Se Figur 1.8.2-9 för definition av J-integralen.

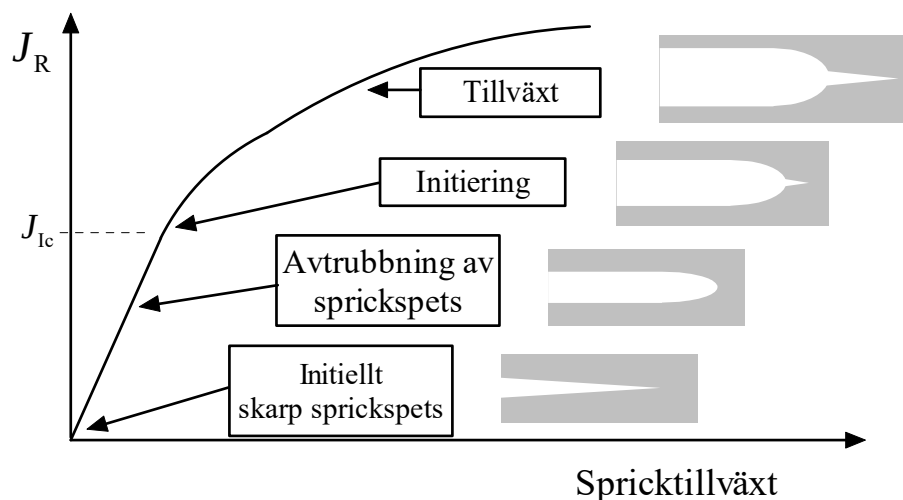


Figur 1.8.2-9 Definition av J-integralen.

Figure 1.8.2-9 Definition of the J-integral.

### Bestämning av materialets $J_R$ -kurva

För att med olinjär brottmekanik kunna bedöma risken för initiering och tillväxt av en spricka i en komponent tillverkad i ett duktilt material krävs det kännedom om materialets  $J_R$ -kurva. Betrakta en initieellt skarp spricka i en brottmekanisk provstav (vanligtvis "Compact Tension"-provstav) uttagen från komponenten. Vid pålastning av provstaven kommer sprickspetsen till en början att avtrubbas genom plasticering och en betydande plastisk zon utvecklas framför sprickspetsen. Tillväxt av sprickan sker enbart på grund av avtrubbnings av sprickspetsen och  $J_R$ -kurvan är väsentligen rät med stor lutning, se Figur 1.8.2-8. Vid tillräckligt hög belastning kommer en spricka att starta sin tillväxt från roten på den avtrubbade sprickan och man talar om att den lastnivå som ger sprickinitiering uppnåts,  $J_R = J_{Ic}$ . Eftersom  $J_R$ -kurvan vanligtvis är fortsatt växande från det att  $J_{Ic}$  uppnåts, kan spricktillväxten vara stabil vid fortsatt pålastning beroende av yttre geometri och lastfall. Vid ytterligare fortsatt pålastning kommer dock till slut instabil spricktillväxt ske.



Figur 1.8.2-8 Schematisk  $J_R$ -kurva för duktilt material.

Figure 1.8.2-8 Schematic  $J_R$ -curve for a ductile material.

Formen på ett materials  $J_R$ -kurva ger värdefull information om hur segt materialet beter sig vid spricktillväxt. För specialfallet sprött material planar  $J_R$ -kurva ut direkt efter uppnått  $J_{Ic}$ . För detta material kan både den linjärt elastiska och den olinjära brottmekaniken tillämpas och  $K_{Ic}$  har då sin direkta motsvarighet i  $J_{Ic}$  enligt

$$J_{Ic} = \frac{K_{Ic}^2}{E} (1 - \nu^2) \quad (1.8.2-10)$$

där  $E$  är materialets elasticitetsmodul och  $\nu$  är Poissons tal för materialet.

En vanligt använd provningsstandard för bestämning av  $J_R$ -kurva är ASTM 813. Från denna standard framgår det bl.a. att provstaven måste uppfylla följande geometriska krav för att säkerställa att påkänningen är  $J$ -karaktäriserad

$$B \text{ och } b > \frac{25J_{Ic}}{R_p} \quad (1.8.2-11)$$

där  $B$  är provstavens tjocklek,  $b$  är kvarvarande ligament framför sprickspetsen och  $R_p$  är det provade materialets sträckgräns. Vid en jämförelse med motsvarande geometriska krav vid provning av brottsegheten  $K_{Ic}$  finner man att betydligt mindre provstavar kan användas vid bestämning av  $J_{Ic}$  jämfört med bestämning av  $K_{Ic}$ .

#### Villkor för initiering av spricktillväxt

Vid bedömning av en spricka i en komponent jämförs det beräknade värdet på  $J$ -integralen, drivkraften för spricktillväxt, med  $J_R$ -kurvan för komponentens material. Vid initiering av spricktillväxt gäller

$$J = J_{Ic} \quad (1.8.2-12)$$

Metoder för bedömning och eventuellt tillgodoräknande av stabil tillväxt av sprickor behandlas inte närmare i denna handbok. Istället hänvisas till facklitteratur inom brottmekanikområdet [Anderson, Nilsson].

#### Initiering och tillväxt av krypsprickor

Detta område behandlas i korta drag nedan vid genomgången av R5-proceduren.

##### *1.8.2.5 Metoder och procedurer för bedömning av haveri genom brott eller kollaps*

Ett flertal metoder och procedurer existerar för bedömning av defekter i konstruktioner. Nedan beskrivs kortfattat de metoder eller procedurer som nyttjas mest i Sverige.

#### R6-metoden

Säkerhetsmarginalen mot tidsberoende haveri genom brott eller kollaps kan bestämmas med R6-metoden. Den värsta lastkombinationen studeras och relevant materialdata nyttjas. Gången är i korta drag följande:

1. anskaffa materialets brottseghetsvärde,  $K_{Ic}$ , och sträckgräns,  $R_p$ , vid aktuell temperatur.
2. bestäm spänningsintensitetsfaktorn,  $K_I$ , för studerad spricka (för ytdefekt, både vid skärningen med den fria ytan och vid sprickans djupaste punkt).
3. bestäm gränslasten,  $P_{Lc}$ , för den spruckna komponenten (enbart kraftstyrda belastningar ska beaktas).
4. definiera  $K_r = \frac{K_I}{K_{Ic}}$  och  $L_r = \frac{P}{P_{Lc}}$  där  $P$  är den kraftstyrda delen av den last komponenten är utsatt för.

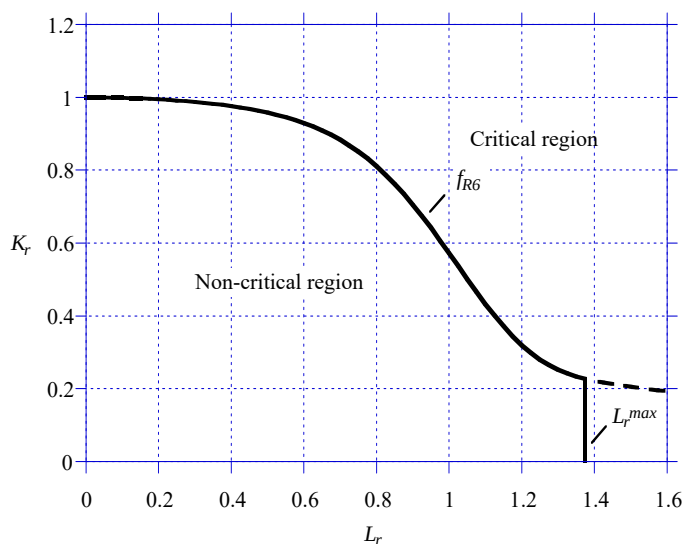


5. skapa ett "Failure Assessment Diagram", FAD, med  $K_r$  på y-axeln och  $L_r$  på x-axeln.

6. skapa ett område som i x-riktningen begränsas av  $L_r^{\max} = \frac{0.5(R_p + R_m)}{R_p}$  i

fallet att materialet ej har något sträckgränsområde och  $L_r^{\max} = 1$  om sträckgränsområde förekommer, och i y-riktningen begränsas av  $K_r = (1 - 0.14 L_r^2) [0.3 + 0.7 e^{(-0.65 L_r^6)}]$ , se Figur 1.8.2-9.  $R_m$  är materialets brottgräns vid aktuell temperatur.

7. använd de i punkt 4 beräknade värdena på  $L_r$  och  $K_r$  och rita in punkten ( $L_r, K_r$ ) i diagrammet.
8. om punkten hamnar på gränsen till eller utanför det inritade området har sprickan överskridit kritisk storlek.
9. om punkten hamnar innanför det inritade området inträffar inte haveri och marginal till brott och plastisk kollaps kan bedömas.



Figur 1.8.2-9 ' Failure Assessment Diagram', FAD.

Figure 1.8.2-9 Failure Assessment Diagram, FAD.

Olika krav på marginaler till brott och plastisk kollaps tillämpas i olika normer. För konventionella anläggningar används exempelvis i Sverige en säkerhetsfaktor 2 mot brott och en säkerhetsfaktor 1.5 mot plastisk kollaps.

### R5-proceduren

Innehållet i R5-proceduren baseras på kunskap inom områdena strukturmekanik och materialvetenskap. Syftet med R5 är att tillhandahålla en heltäckande bedömningsprocedur för strukturer, med eller utan defekter, som utsätts för skademekanismerna krypning och utmattnings. Proceduren är vidare tänkt att komplettera den amerikanska ASME Section III, Division 1 - NH, och den franska RCC-MR och framförallt då med avseende på svetsade strukturer och strukturer innehållande defekter. De beräkningar som utförs inom R5 baseras huvudsakligen på den så kallade referensspänningsmetoden. Detta är en kompromiss mellan att använda

den mer konservativa linjära analysen och den betydligt mer komplexa och kostsamma ickelinjära analysen.

R5-proceduren omfattar sju volymer enligt följande:

1. Överblick av proceduren.
2. Procedur för bedömning av komponenter utan defekter.
3. Procedur för bedömning av initiering av sprickor på grund av kryputmattnings.
4. Procedur för bedömning av defekter under konstant belastning.
5. Procedur för bedömning av spricktillväxt på grund av kryputmattnings.
6. Procedur för bedömning av blandsvetsar.
7. Procedur för bedömning av defekter i CrMoV-svetsar vid konstant last.

Nedan anges i korta drag hur en defekt i en komponent utsatt för krypning bedöms enligt R5-proceduren. Den övergripande gången i proceduren framgår av Figur 1.8.2-10.

#### *Fastställ orsak till sprickbildning*

För att kunna bedöma en sprickas inverkan på en högtemperaturkomponents integritet måste orsaken till sprickbildningen fastställas. Oftast kan detta göras med en enklare metallografisk undersökning. I denna första undersökning ingår också att fastställa ifall påtaglig krypskada återfinns i det område genom vilket den påträffade eller antagna sprickan förväntas växa.

I R5-proceduren behandlas initiering och tillväxt av sprickor p.g.a. krypning och utmattnings. Andra orsaker till sprickbildning såsom spänningskorrosion eller liknande miljöbetingad sprickbildning kan inte bedömas utgående från R5-proceduren.

#### *Definiera driftshistorik och kommande framtida drift*

Ju noggrannare driftshistoriken och kommande framtida drift kan fastställas desto noggrannare kan skadetålighetsbedömningen göras. Vid en första grovre analys används vanligen designdata för belastningarna medan loggade kontrollrumsinstrument eller data från kontinuerlig övervakning används när högre noggrannhet krävs.

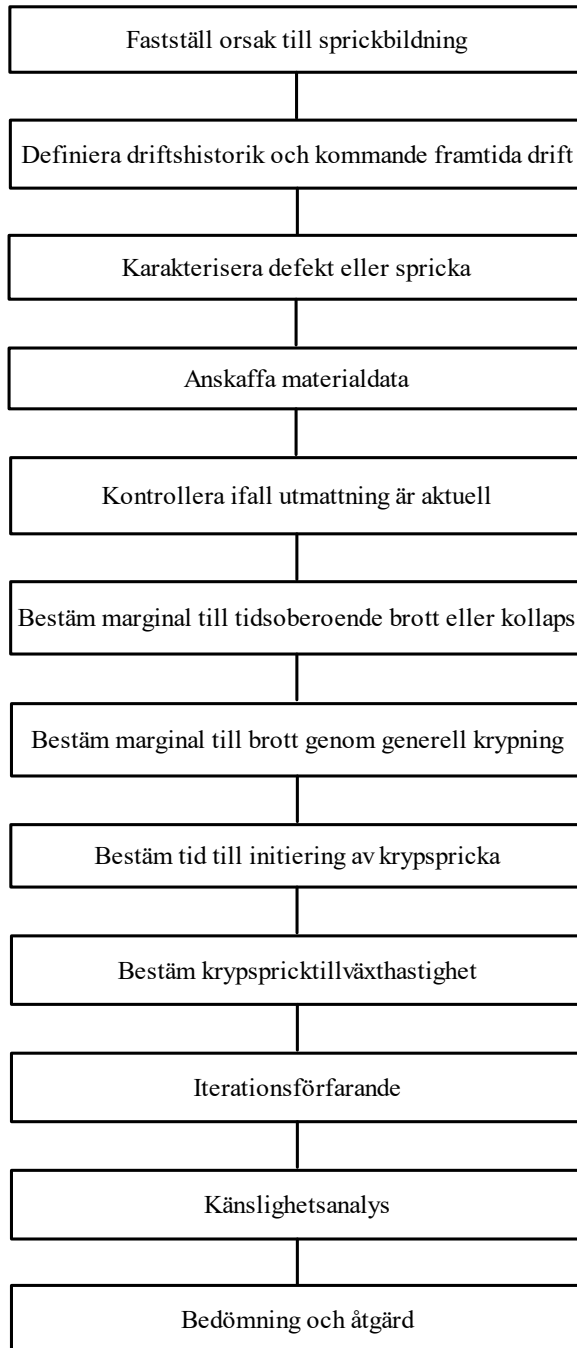
För att förenkla analysen är det vanligt att de belastningar anläggningen varit utsatt för, och planeras att utsättas för, delas in i undergrupper där belastningen sätts konstant. Händelser som bidrar till utmattnings, såväl som onormala överlastar vid exempelvis incidenter, måste beaktas.

Vid analysen är det viktigt att man skiljer på primära och sekundära spänningar. Primära spänningar är sådana spänningar som bidrar till plastisk kollaps. Dessa kan orsakas av laster såsom inre tryck och andra mekaniska laster. Sekundära spänningar är sådana spänningar som inte bidrar till plastisk kollaps utan är självbegränsande, exempelvis termiska spänningar och svetsegensspänningar. För klassificering av spänningar se [avsnitt 1.8.1](#) i handboken.

#### *Karakterisera defekt eller spricka.*

En defekts eller sprickas storlek och läge är avgörande för skadetålighetsanalysen. Sprickgeometrier delas in i tre huvudgrupper; innesluten elliptisk defekt, elliptisk ytdefekt och fullt genomgående rektangulär defekt. För oregelbundna defekter med en

geometri som är svår att definiera används elliptisk eller rektangulär defektform, som innesluter hela den oregelbundna defekten.



Figur 1.8.2–10 Övergripande gången i R5-proceduren.

Figure 1.8.2–10 Overview of the R5 route.

*Anskaffa materialdata*

Materialdata behövs för ett flertal bedömningar såsom:

1. marginal till brott eller kollaps.
2. marginal till tidsberoende brott p.g.a. generell krypning.
3. tid till initiering av spricka p.g.a. utmattning och/eller krypning.
4. tillväxt av spricka p.g.a. utmattning och/eller krypning.

Det är väsentligt att de materialdata som används vid bedömningen representerar aktuell driftshistorik och framtida drift vad avser spänning, temperatur, materialåldrande, etc. Om möjlighet ges kan det bli aktuellt att bestämma materialets egenskaper genom förstörande provning. I andra fall får materialdatavärden hämtas ur normer eller standarder.

*Kontrollera ifall utmattning är aktuell*

En bedömning av spricktillväxt p.g.a. kryputmattning är i allmänhet komplicerad att genomföra och här refereras enbart till R5-dokumentet.

*Bestäm marginal till tidsberoende brott eller kollaps*

Marginal till tidsberoende brott eller kollaps bestäms med R6-proceduren, se ovan.

*Bestäm marginal till brott genom generell krypning*

Förutom att den skadade komponenten kan haverera genom att sprickan växer kan generell krypning i kvarvarande ligament framför sprickspetsen leda till brott. Marginal till brott genom generell krypning bestäms utgående från konstant belastning enligt följande:

1. Bestäm referensspänningen beaktande sprickan:  $\sigma_{\text{ref}} = L_r R_p$  (se R6-metoden ovan).
2. Beräkna tid till krypbrott utgående från materialets krypbrottekvation vid aktuell temperatur och  $\sigma_{\text{ref}}$  enligt:  $t_{\text{r,ref}} = A(\sigma_{\text{ref}})^{-\nu}$  där  $A$  och  $\nu$  är materialparametrar som bestäms utgående från enaxlig krypprovning.
3. Om komponenten är utsatt för flera belastningsnivåer sker summering av krypskadan enligt linjär delskadeteori:  $D_c = \sum_i \left( \frac{t^{(i)}}{t_{\text{r,ref}}^{(i)}} \right)$  där krypbrott fås vid  $D_c = 1$ .

Enligt de svenska Tryckkärlsnormerna, TKN87, och Rörledningsnormerna, RN78, tillåts  $D_c$  för primär membranspänning uppgå till ca 0.2.

*Bestäm tid till initiering av krypspricka*

Tiden till initiering av en krypspricka,  $t_i$ , definieras som den tid det tar från det att en initieellt skarp spricka belastas tills dess att en krypspricka börjar växa från roten av den avtrubbade sprickspetsen.

*Bestäm krypspricktillväxthastigheten*

Vid konstant krypspricktillväxt har man funnit att den så kallade  $C^*$ -parametern karakteriserar tillväxtförloppet. Genom beräkning av  $C^*$  för den spruckna komponenten (bestäms genom FE-analys eller genom en approximation nyttjande referensspänningskonceptet) och med kännedom om materialets krypspricktillväxtlag kan krypspricktillväxthastigheten bestämmas.

Krypspricktillväxtlagen har följande utseende

$$\dot{a} = D_0 (C^*)^\phi \quad (1.8.2-13)$$

där  $\dot{a}$  är krypsprickans tillväxthastighet och  $D_0$  och  $\phi$  är materialkonstanter. Materialkonstanterna i (1.8.2–13) erhålls antingen genom krypspricktillväxtprovning av aktuellt material eller via befintlig materialdata från standard eller databank.

*Iterationsförfarande*

Efterhand krypsprickan växer i komponenten ändras parametrarna  $C^*$ ,  $K_I$ ,  $P_{Lc}$  och  $\sigma_{ref}$ . Detta innebär att beräkningarna enligt ovan måste uppdateras med jämna intervall.

*Känslighetsanalys*

Känslighetsanalysen är en mycket viktig del av bedömningen. Syftet med denna är att studera olika parametrars inverkan på resultatet. Inverkan av de parametrar vars värden är mest osäkra studeras speciellt.

*Bedömning och åtgärder*

Baserat på resultaten från genomförd analys görs en bedömning om aktuell komponent kan tas i drift utan åtgärd eller om åtgärder såsom ändrad belastningsspecifikation, reparation av komponenten, utbyte av komponenten, etc behöver vidtas för fortsatt drift.

Övriga metoder, standarder och procedurer

Förutom R6-metoden och R5-proceduren förekommer det ett antal metoder, standarder och procedurer som inte presenteras närmare i denna handbok.

För bedömning av sprickor i komponenter som arbetar vid en temperatur under gränstemperaturen för krypning finns förutom R6-metoden följande dokument:

- British Standard PD 6493.
- ASME XI.

För bedömning av sprickor i komponenter som arbetar i krypområdet finns förutom R5-proceduren följande dokument tillgängliga:

- British Standard PD 6539.
- RCC-MR Appendix 16 (franska normer för brottmekanisk bedömning av sprickor i komponenter för kärntekniska applikationer).

Dessutom har EU-finansierade forskningsprojekt genomförts för framtagning av ytterligare förbättrade procedurer för brottmekanisk bedömning av defekter i komponenter som arbetar under (SINTAP) respektive över (HIDA) gränstemperaturen för krypning.

### 1.8.3 Praktiskt exempel: spännings- och skadetålighetsanalys av en komponent med krypsprickor

I samband med replikprovning av ett formstycke upptäcktes sprickor i svetsarna mot två anslutande rör, se Figur 1.8 - 11. Anläggningen togs i drift strax därpå utan att sprickorna hade åtgärdats. Vid utvärdering av replikproverna konstaterades krypsprickor och att det fanns omfattande krypskador i form av krypkaviteter i omkringliggande material. Sprickorna var upp till 70 mm långa och med okända sprickdjup. Det skulle innebära stora produktionsbortfall att stoppa anläggningen omedelbart. Därför genomfördes en skadetålighetsanalys i syfte att ge underlag till att avgöra om det är möjligt att på ett säkert sätt fortsätta driften tills anläggningen kan stoppas utan större ekonomiska konsekvenser.



**Figur 1.8-11** Formstycke i en huvudångledning. Sprickor hittades i svetsskarv 3 och 4.

**Figure 1.8-11** Main steam pipe component where cracks were found in weld 3 and 4.

#### Skadetålighetsanalys av formstycke

En skadetålighetsanalys betyder i det här fallet att en spännings- och brottmekanisk analys behöver genomföras. Arbetsgången och vilka olika delresultat som uppnås för att ge den totala bild som behövs för att kunna bedöma skadetåligheten ges nedan.

*Datainsamling*

Följande data behövs för analysen:

- Laster (historiska, framtida)
- Materialdata (materialstandarder, materialintyg, provningsintyg)
- Geometridata (ritningar, mätning på plats etc.)

Laster: Drifttryck 110 bar vid 540°C

Materialdata: Material 10CrMo9 10 (DIN 17155)

- sträckgräns vid 20 grader = 300 MPa
- sträckgräns vid 540 grader = 175 MPa
- brottgräns = 480 MPa
- E-modul vid 540 grader = 160 GPa
- Poissons tal = 0.3
- brottseghet  $K_{IC}$  vid 20 grader = 100 MPa
- krypbrottgräns vid 540 grader (10 000 h) = 122 MPa
- krypbrottgräns vid 540 grader (100 000 h) = 78 MPa
- 1 % kryptöjningsgräns vid 540 grader (10 000 h) = 94 MPa
- 1 % kryptöjningsgräns vid 540 grader (100 000 h) = 58 MPa

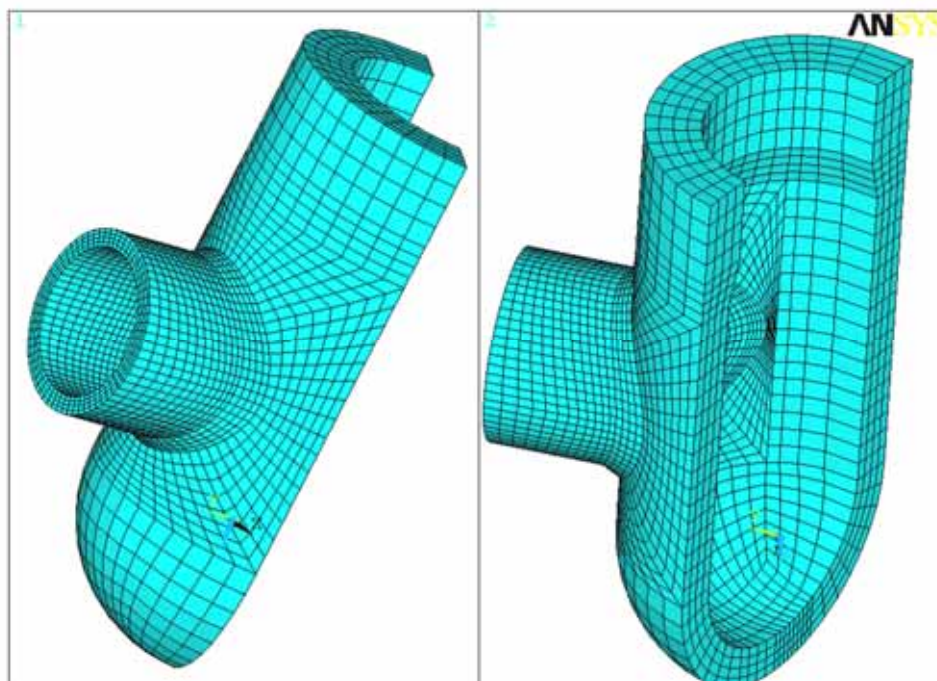
Svetsgenspänningar: Avspänningsglödning genomfördes efter svetsning, vilket innebär att svetsgenspänningarna kan antas ha relaxerats ned till ca 20 % av sträckgränsen vid rumstemperatur, dvs. ca 60 MPa.

Geometridata: Ritningar*Spänningsanalys*

En komplett spänningsanalys av formstycket utförs genom att använda en tredimensionell modell av finita element. En 3D-modell av ånglådan är byggd i ANSYS 5.7. Samtliga element är av typen SOLID95. Alla geometriska dimensioner är tagna från ritning. Pga. symmetri har endast ena halvan av lådan modellerats, se Figur 1.8–12.

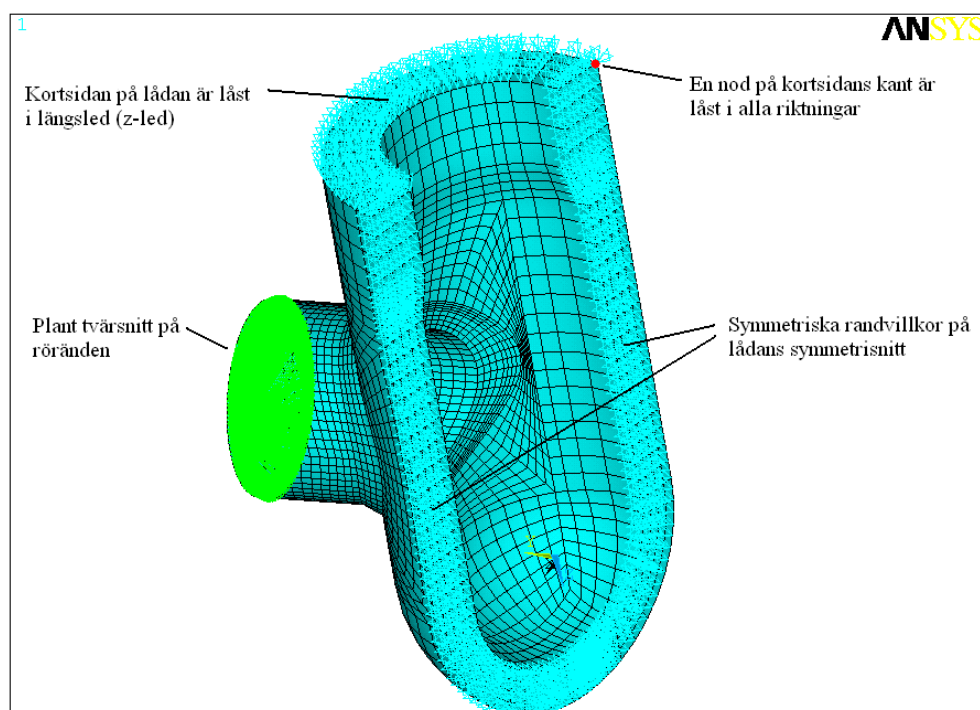
Symmetriska randvillkor är pålagda på lådans symmetrisnitt. Lådans kortsida är låst i dess längsriktning (z-led). En nod på kanten är låst helt i alla riktningar (motsvarar symmetriska randvillkor), se Figur 1.8–13. I Figur 1.8–14 visas dragspänningen i ångledningens riktning, vilket är den spänning som verkar på och driver de påträffade ytsprickorna vid svetsarna skarv 2 och 3.





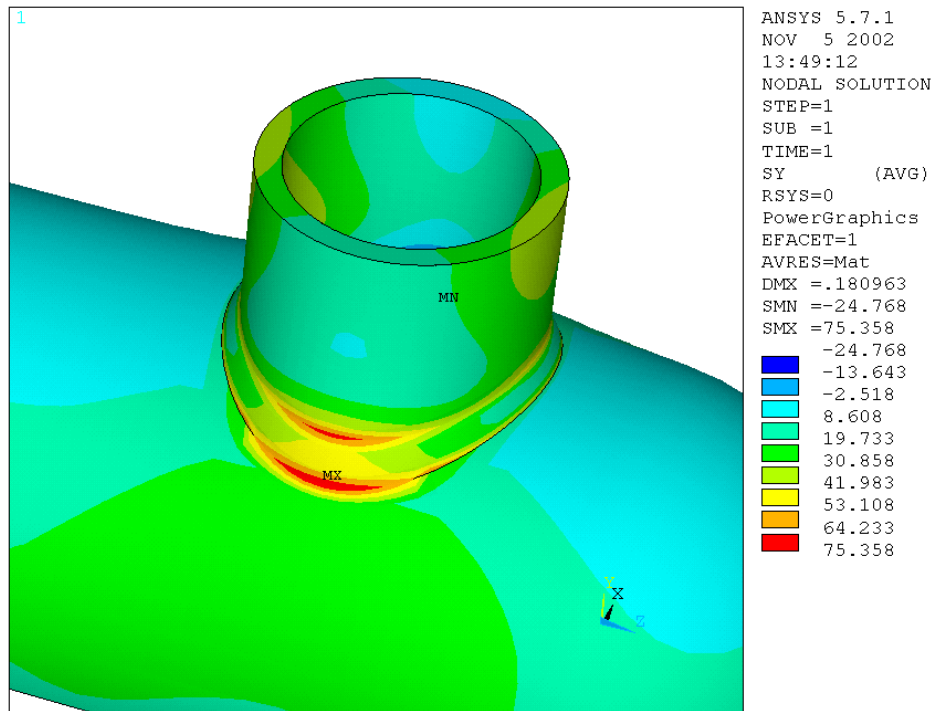
Figur 1.8–12 Tredimensionell finita element-modell av analyserat formstycke.

Figure 1.8–12 Three dimensional finite element model of the analysed component.



Figur 1.8–13 Randvillkor för analyserat formstycke.

Figure 1.8–13 Boundary conditions for the analysed component.



**Figur 1.8–14** Dragspänningen i ångledningens riktning, vilket är den spänning som verkar på och driver de påträffade ytsprickorna vid svetsarna skarv 2 och 3.

**Figure 1.8–14** Tension stresses in the steam pipe direction which are the stresses that control and drive the observed cracks at welds 2 and 3.

Spänningarna som erhålls från denna modell delas upp i membranspänning (klassas som primär och bidrar till plastisk kollaps) samt böj- och toppspänning (klassas som sekundär och bidrar inte till plastisk kollaps). Till spänningarna adderas svetsegenspänningen på 60 MPa (membranspänning, dvs. konstant genom godstjockleken) för de sprickor som ligger vid en svets skarv. Denna spänning är sekundär och bidrar inte till plastisk kollaps.

#### *Brottmekanisk analys*

Den brittiska R6-metoden används, där defekter utvärderas med avseende på risk för såväl plastisk kollaps som sprödbrott. Marginal mot sprödbrott och plastisk kollaps tillgodoses genom säkerhetsfaktorer.

I analysen beräknas acceptabel defektstorlek, med vilken avses den defektstorlek som maximalt kan tillåtas med bibehållen, med säkerhetsfaktorer föreskriven, säkerhet gentemot plastisk kollaps och sprödbrott. Även kritisk defektstorlek beräknas. Det avser den defektstorlek då plastisk kollaps eller sprödbrott, dvs. ett haveri, inträffar. Det är i princip samma beräkning som för acceptabel defektstorlek utan säkerhetsfaktorer.

Resultaten redovisas i form av acceptabelt och kritiskt sprickdjup, där sprickdjupet betecknas *a*.

Den största påträffade sprickan var 70 mm lång med okänt djup. För att erhålla ytterligare underlag analyserades även hur djup en 400 mm lång spricka kan tillåtas vara.

Analysen visar att en ytspricka med längd 70 mm kan vara >21 mm djup och ändå vara acceptabel med hänsyn tagen till risken för sprödbrott och plastisk kollaps. Det är >80 % av godstjockleken som är 26 mm. Hur mycket djupare sprickan kan vara är okänt eftersom det användas beräkningsprogrammet, ProSACC, beräknar upp till maximalt 80 % av godstjockleken.

En spricka med längd 400 mm kan vara drygt 15 mm djup (60 % av godstjockleken) och ändå vara acceptabel. Resultaten pekar på att det inte finns risk för ett momentant haveri med en 70 mm lång krypspricka. Erfarenhetsmässigt är sprickor av motsvarande längd och vid motsvarande geometriska förhållanden är betydligt grundare än 21 mm vid motsvarande godstjockleken.

#### *Krypskadeutveckling – beräkning av krypbrottid*

Krypbrottiden är ett mått på hur lång tid det tar innan materialet slits itu pga. krypning med ett givet tryck och vid en given temperatur, dvs. krypbrottiden är ett mått på kryplivslängden för ett i övrigt oskadat material. Om en spricka skulle uppstå i materialet under krypprocessens gång kommer ett haveri att uppstå snabbare än vad denna krypbrottid indikerar. Detta fall, med existerande sprickor, analyseras senare separat.

Krypbrottid som funktion av spänning kan uttryckas som

$$t_r = A\sigma^{-m}$$

där  $A$  och  $m$  är materialkonstanter, jfr. **Figur 1.5-11 i avsnitt 1.5.2**. Med tabellerade materialdata för 10CrMo9-10, se ovan, kan  $A$  samt  $m$  beräknas och följande uttryck erhållas:

$$t_r = 5,55 \times 10^{14} \sigma^{-5,15}$$

Högsta spänningen lokalt närmast ytterytan är ca 75 MPa, se Figur 1.8–14. Denna spänningsnivå ger lokalt vid detta snitt en krypbrottid på i storleksordningen 120 000 timmar, om ångledningen utsätts för 110 bar vid 540 grader. Att det inte är 120 000 timmar ganska exakt beror på att det med tiden, i och med att det kryper, kommer att ske omlagringar i den spänningsfördelning som visas i Figur 1.8–14. Den verkliga livslängden kan dock förväntas vara längre än 120 000 timmar pga. detta. Eftersom drifttiden var 110 000 timmar visar resultaten ger i alla fall att krypskada kan ha uppstått lokalt på ytterytan vid detta snitt och att merparten av kryplivslängden är förbrukad.

#### *Analys av krypspricktillväxt*

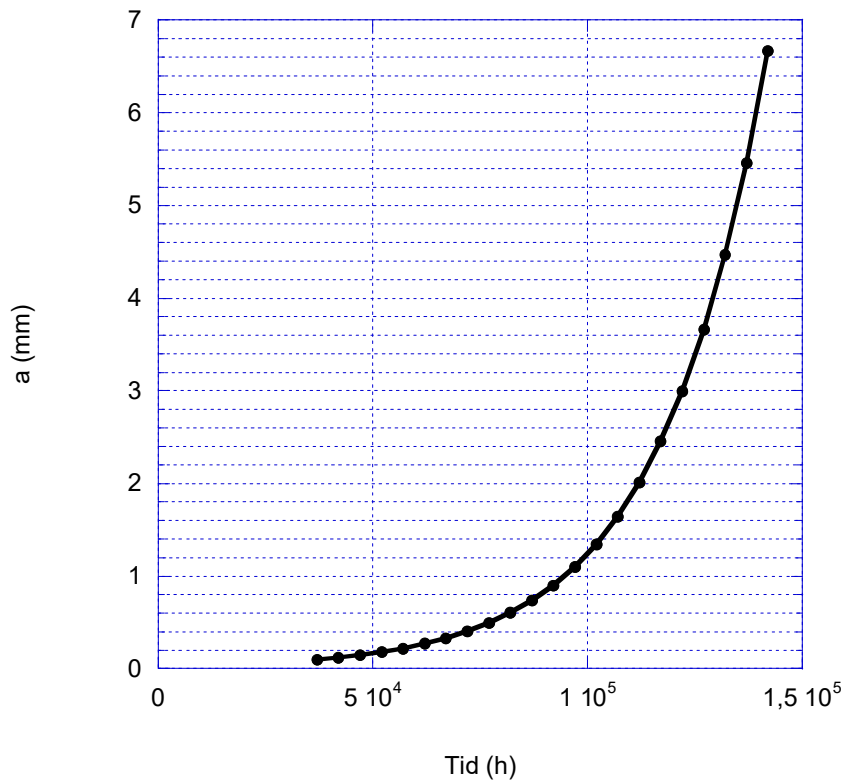
Krypspricktillväxthastigheten

$$\dot{a} (= da/dt)$$

kan beskrivas enligt sambandet

$$\dot{a} = \frac{150}{\epsilon_f} (B\sigma_{ref}^{n-1} K^2)^{\frac{n}{n+1}}$$

där  $a$  är sprickdjup,  $\epsilon_f$  är materialets enaxliga krypduktilitet,  $K$  är spänningsintensitetsfaktorn och  $\sigma_{ref}$  är referensspänningen. Från tabellerade materialdata ovan kan  $B$  och  $n$  beräknas till  $3,88 \times 10^{-16}$  respektive 4,77. Spricktillväxt som funktions av tid kan då plottas, se Figur 1.8–15.



Figur 1.8-15 Tid som funktion av sprickdjup,  $a$ , för analyserade krypsprickor.

Figure 1.8-15 Crack depth,  $a$ , vs. time for analysed creep cracks.

Figuren visar att tillväxten av en ytdefekt pga. krypning är relativt snabb genom godset i kanten mellan skarv och rörledning. En spricka 70 mm lång och djup  $a=4$  mm i denna position kan förväntas växa igenom hela godset (rörledningen) inom ca 10 000 timmar. Eftersom en 70 mm lång krypspricka mycket väl kan vara 4 mm djup kunde inte ytterligare en hel säsong drift tillåtas. Anläggningen stoppades och sprickorna slipades ur. Sprickdjupet var 3–4 mm. En ny beräkning gjordes med utgångspunkt från den nya geometrin med bortslipade sprickor. Det resulterade i initiering och tillväxt genom hela godset var att förvänta efter ca 7 000 timmar. Man hade inte möjlighet att reparationssvetsa vid det korta stoppet. Ytterligare 2500 timmars drift tilläts till nästa planerade stopp då formstycket kunde bytas. Efter driftstoppet visade det sig att en ny, mindre, spricka som var ca 2 mm djup hade hunnit bildas under de 2500 timmarna i drift. Beräkningsresultaten visade en god och i viss mån konservativ överensstämmelse med verkligheten.

## REFERENSER

- Anderson, T.L. 1995. Fracture Mechanics - Fundamentals and applications, Second Edition, CRC Press, Inc.
- ASME - Boiler and pressure vessel code, 1998. Section III, Division 1, ASME New York.
- ASME - Boiler and pressure and vessel code. 1998. Section III, Division 1 - NH, Class 1 Components in Elevated Temperature Service, Rules for construction of nuclear power plant components, ASME, New York.
- ASME - Boiler and pressure vessel code. 1998. Section VIII, Division 1, ASME New York.
- ASME - Boiler and pressure vessel code. 1998. Section XI, Division 1, ASME New York.
- ASTM E 399. 1990. Standard test method for plane-strain fracture toughness of metallic materials.
- ASTM E 813. 1987. Standard test method for  $J_{Ic}$ , a measure of fracture toughness.
- ASTM E 1457-92. 1992. Standard test method for measurement of creep crack growth rates in metals.
- Andersson, H., Segle, P. och Andersson, P. 1998. Sprickpropagering hos driftpåkänt svetsgods av 0.5CrMoV, Värmeforsk, 641/ M3-407.
- Andersson, P., Bergman, M., Brickstad, B., Dahlberg, L., Nilsson, F. and Sattari-Far, I. 1996. A procedure for safety assessment of components with cracks - Handbook, 3<sup>rd</sup> revised edition, SAQ/FoU-Report 96/08, SAQ Kontroll AB, Stockholm, Sweden.
- Anderson, T.L 1995. Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications, 2<sup>nd</sup> Edition, CRC Press, Inc.
- British Standard Published Document PD 6493 - Guidance on methods for assessing the acceptability of flaws in welded structures. 1991. British Standards Institution, London.
- British Standard Published Document PD 6539 - Guide to methods for the assessment of the influence of crack growth on the significance of defects in components operating at high temperatures. 1994. British Standards Institution, London.
- Formelsamling i hållfasthetslära. 1978. Institutionen för hållfasthetslära, KTH, Civiltryck AB, Stockholm.
- Hechmer, J.L. and Hollinger, G.L. 1998. 3D stress criteria guidelines for application, WRC Bulletin 429.
- HIDA. 1995. Validation, Expansion and Standardisation of Procedures for High Temperature Defect Assessment, Project Programme of Brite/EuRam, Project BE 1702.
- Hult, J. 1975. Bära brista - Grundkurs i hållfasthetslära, Almqvist & Wiksell Förlag AB.
- Milne, I., Ainsworth, R.A., Dowling, A.R. and Stewart, A.T. 1988. Assessment of the integrity of structures containing defects, Int. J. Pres. Vessels Pip., Vol 32, pp. 3-104.

- Nilsson, F. 1997. Fracture mechanics - From theory to applications, Royal Institute of Technology, Dept. of Solid Mechanics, S-100 44 Stockholm, Sweden.
- Nuclear Electric. 1996. R5: An assessment procedure for the high temperature response of structures, Nuclear Electric plc Report R5 Issue 2, Rev 1, Berkely Nuclear Laboratories, Nuclear Electric plc, UK.
- prEN 13445: Unfired pressure vessel equipment, CEN/TC 54, 1999.
- RCC-MR. 1985. Design and construction rules for mechanical component of FBR nuclear islands, AFCEN, Paris.
- Rörledningsnormer 1978, RN78, Tryckkärlskommissionen 1978.
- SINTAP. 1995. Structural Integrity Assessment Procedures for European Industry, Project Programme of Brite/EuRam, Project BE 1426.
- Timoshenko, S.P. and Goodier, J.N. 1988. Theory of elasticity, Third edition, Mc Graw-Hill Book Company.
- Tryckkärlsnormer 1987, TKN87, Tryckkärlskommissionen 1987.
- Viswanathan, R. 1989. Damage mechanisms and life assessment of high-temperature components, ASM Internationals.
- Webster, G.A. and Ainsworth, R.A. 1994. High temperature component life assessment, Chapman & Hall, London.
- Young, W.C. 1989. Roark's Formulas for Stress & Strain, 6<sup>th</sup> edition, Mc Graw-Hill Book Company.



## 1.9 RISKBASERADE METODER FÖR PLANERING AV INSPEKTION OCH PROVNING

De flesta svenska kraft- och kraftvärmeverk är byggda för mer än 20 år sedan, med den naturliga följderna att andelen äldre utrustning blir allt större i anläggningarna.

Anläggningar innehåller alltid komponenter som är mer påkända än andra och därmed har en relativt sett kortare livslängd. I många kraftverk sker även byten av bränsle och förbränningssätt för att förbättra ekonomi och miljö, vilket medför att villkoren för olika komponenters livslängd väsentligen kan förändras. En ökande andel åldrande utrustning i anläggningarna medför ett ökat behov av att vid rätt tidpunkt utföra provning och underhåll. Utvärderingen bör baseras både på komponenternas kondition och utifrån säkerhet och ekonomi.

Ökad konkurrens och ökade vinstkrav gör att resurser till underhåll och provning vanligen blir allt mer begränsade. Det är därför viktigt att kunna undersöka och planera hur företaget ska satsa resurser på provning, utbyten och underhåll för bästa långsiktig lönsamhet för anläggningen, och att kunna motivera dessa behov uttryckt i ekonomiska termer.

När flera komponenter i en anläggning samtidigt närmar sig den livslängd som aktuell driftmiljö och degradering medför, är det viktigt att kunna prioritera de förebyggande aktiviteterna på ett systematiskt sätt. Det gäller att övervaka och beräkna hur länge komponenter kan vara i drift innan de behöver provas eller åtgärdas. Med användande av riskbaserad metodik kan mycket informativa underlag tas fram för prioritering och planering av kommande aktiviteter i en anläggning. Genom riskbaserad analys får man möjligheten att kombinera utvärdera komponenternas kondition och ekonomi eller säkerhet. Den grundläggande idén är att väga samman sannolikheten för haveri/felfunktion (återstående livslängd) och konsekvensen om felet uppstår (säkerhet och kostnad).

### 1.9.1 Bakgrund

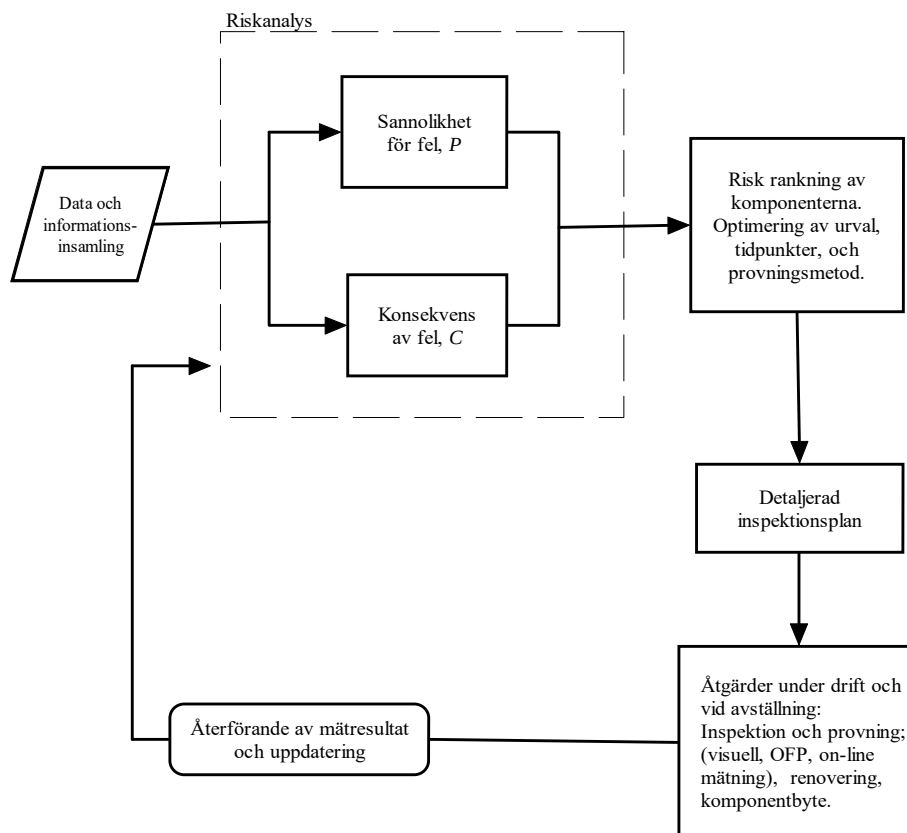
För att kunna nå önskad säkerhet och lönsamhet i en anläggning är det av avgörande betydelse att planering av kommande underhåll och provning görs baserat på bra underlag. Planering, utvärdering och optimering utifrån ett riskmått kan i princip användas som grundidé avseende ett flertal aktiviteter, så som inspektion, provning, komponentutbyten, ombyggnader, underhåll och driftsätt. I detta kapitel kommer vi att behandla riskbaserade metoder för planering och optimering av inspektion och provning, vilket brukar kallas RBI (Risk Based Inspection). Det kan nämnas att användning av riskbaserade metoder för styrning av förebyggande underhåll brukar kallas RCM, Reliability Centred Maintenance.

Probabilistisk riskanalys är nära relaterat till tillförlitlighetsanalys [2, 4-6, 20]. Tillförlitlighetsmetodik utvecklades först inom flyg och rymdindustrin på sextioalet, men senare även för komplexa system inom kärnkraft och elektronikindustrin. Probabilistisk tillgänglighets- och riskmetodik används för att förbättra säkerhet och lönsamhet i industriella anläggningar, både genom utvärdering vid *design* av system, men även genom optimering av *underhåll och drift*. Delsteg vid riskbaserad planering och optimering av inspektion och provning illustreras i Figur 1.9-1.

Riskbaserad metodik för planering av provning och underhåll utnyttjas i dag inom petrokemisk industri, offshore industrin och kärnkraftsindustrin. En stor del av utvecklingen av RBI-metodiken har på senare tid skett inom raffinaderi- och kraftindustrin i USA [18,19, 13-15, 16] och inom offshoreindustrin [17]. Syftet är att



inriktad kontroll och provning mot de komponenter som ger högst riskbidrag för att nå ökad lönsamhet vid en given säkerhetsnivå. Resultatet visar sig ofta som en markant minskning av både planerade och oplanerade produktionsstopp. Riskmetodik används normalt vid designen av kraftvärmeverk eftersom det är ett komplext system. Tillämpningen av riskbaserade metoder för styrning av inspektion och underhåll börjar nu ta fart i kraftvärmeindustrin. Metodiken ger möjlighet till konkurrensfördelar även inom denna bransch, genom optimering av provningskostnaderna vid bibehållen säkerhetsnivå, eller för ökad tillgänglighet.



**Figur 1.9-1. Riskbaserad planering innefattar delstegen: riskanalys, optimering, planering, utförande av åtgärder samt uppdatering.**

**Figure 1.9-1. Risk based planning includes the steps: risk analysis, optimisation, detailed planning, execution of actions, and updating.**

### 1.9.2 Begreppet risk och dess användning för optimering

I många sammanhang används ordet risk i betydelsen "sannolikhet" eller "fara", och utan någon exakt definition. Då ordet används i betydelsen fara kan det gälla fara för ekonomi, utrustning, personal eller miljö. Orsaken till faran är vanligen en möjlig frigörelse av koncentrationer av energi (högt tryck, hög temperatur) eller av farliga ämnen (explosiva, giftiga).

Då man baserar prioriteringen av åtgärder för komponenter i ett system på risk krävs givetvis en strikt definition av begreppet som ger en relevant storhet att arbeta med. Risk kan sägas vara "sannolik konsekvens per år". Mer specifikt beräknas risknivån  $R$  för en komponent genom att sannolikheten för felfunktion/haveri  $P$  multipliceras med konsekvensen då felet inträffar  $C$ , d.v.s. risk definieras som

$$R = P \cdot C \quad \text{med enheter} \left[ \frac{\text{konsekvens}}{\text{tidsenhet}} \right] = \left[ \frac{\text{fel}}{\text{tidsenhet}} \right] \cdot \left[ \frac{\text{konsekvens}}{\text{fel}} \right] \quad (1.9.1)$$

Sannolikheten  $P$  per tidsenhet kan alternativt tolkas som förväntad felfrekvens (antal fel per tidsenhet). Sannolikheten  $P$  kan uppskattas baserat på erfarenhet eller statistik. För en mängd komponenter kan  $P$  beräknas med probabilistisk tillförlitlighetsanalys. Sannolikheten för fel  $P$  ökar ofta med tiden p.g.a. degradering genom exempelvis korrosion, erosion, krypning, försprödning eller utmattnings. Vid optimering utvärderas risknivån  $R$  för komponenterna i systemet vid olika tidpunkter.

Den förväntade konsekvensen  $C$  om felet inträffar kan vara ekonomisk förlust eller person- och miljöskador. Person- och miljökonsekvens räknas ibland om till kostnad i kronor, ekonomisk konsekvens. En sådan värdering är givetvis subjektiv och inte helt okontroversiell. Måttet risk kan alltså mäta person- och miljö säkerhet eller ekonomisk risk, beroende av enheten på  $C$ .

Sannolikheten för felfunktion eller haveri för en komponent,  $P$ , bestäms på komponentnivå. För att bestämma konsekvensen då komponentfelet inträffar,  $C$ , krävs analys av säkerhetssystem och komponenternas växelverkan.

Tre huvudsteg som alltid ingår vid riskanalys av ett system är:

- identifiering av orsaker till risk,
- sannolikhetsbedömning, och
- konsekvensuppskattning.

### 1.9.3 Orsaker till haveri och driftstopp

Orsaken till haverier och driftstopp kan härledas till komponentfel, operatörsfel, programfel eller fel i råvaror till produktionen. I processindustrin som helhet är grundorsaken till driftstopp fördelad enligt följande: mekaniskt komponentfel ca 41 % och operatörsfel ca 20 %, råvarustörning ca 8 %, samt övriga orsaker (designfel, elektriskt komponentfel, programfel, sabotage, okänt) [1]. De mekaniska felen orsakas av exempelvis korrosion, utmattnings eller överbelastning.

Operatörsfel kan reduceras genom användande av riskanalys med syfte att identifiera potentiella faror och händelsesekvenser, varefter exempelvis förändringar i säkerhetssystem och driftinstruktioner genomförs. Mekaniska fel utgör den största andelen fel i processanläggningar. Fel i komponenter beroende på slitage och degradering kan vanligen relateras till driftförhållanden; påkänning, material, miljö och gångtid. Denna typ av fel ökar med ökande ålder för anläggningen och kan förebyggas genom inspektion och provning. RBI-analys används för planering och optimering av detta arbete.

Mekaniska fel beror oftast på degradering, men ibland även av överlast eller material/svetsfel. Material/svetsfel visar sig ofta tidigt efter att en anläggning tagits i drift. Förhöjd belastning avseende både tryck och temperatur kan exempelvis uppstå vid byte till nytt bränsle. Utmärkande för den största andelen mekaniska fel är dock att de är tidsberoende p.g.a. materialdegradering eller spricktillväxt. Spricktillväxt är ofta exponentiellt ökande med tiden, medan t.ex. korrosion vanligen sker mer linjärt med tiden. De degraderingsmekanismer som kan verka i ett kraftvärmeverk presenteras i **kapitel 1.5**.

#### 1.9.4 Kvalitativ och kvantitativ riskanalys

Riskbaserad analys för planering av inspektion kan väljas att göras på olika detaljeringsnivå. Analysen kan göras kvalitativ eller kvantitativ. Vald analysnivå för ett visst system påverkas av faktorer som; antalet komponenter i systemet, genomsnittskostnaden för byte av komponent, teknisk nivå och budget för den som utför planeringen, typ av konsekvens vid fel i systemet, samt syftet med analysen.

Normalt startar en RBI-analys med en kvalitativ bedömning baserad på erfarenhet och intuition. Detta ger en sortering av komponenterna och överblick över systemen. Utifrån denna bedömning kan mindre riskutsatta system och komponenter sällas bort innan man fortsätter till en kvantitativ riskanalys, där mer detaljerad information krävs. För system med låg kostnad för komponentbyten och låg konsekvens vid fel/haveri är den kvalitativa bedömningen ofta tillräcklig. För system där kostnad för komponentbyten är hög och konsekvens avseende säkerhet eller ekonomi vid fel/haveri är hög bör en kvantitativ analys utföras, efter den första grovsorteringen.

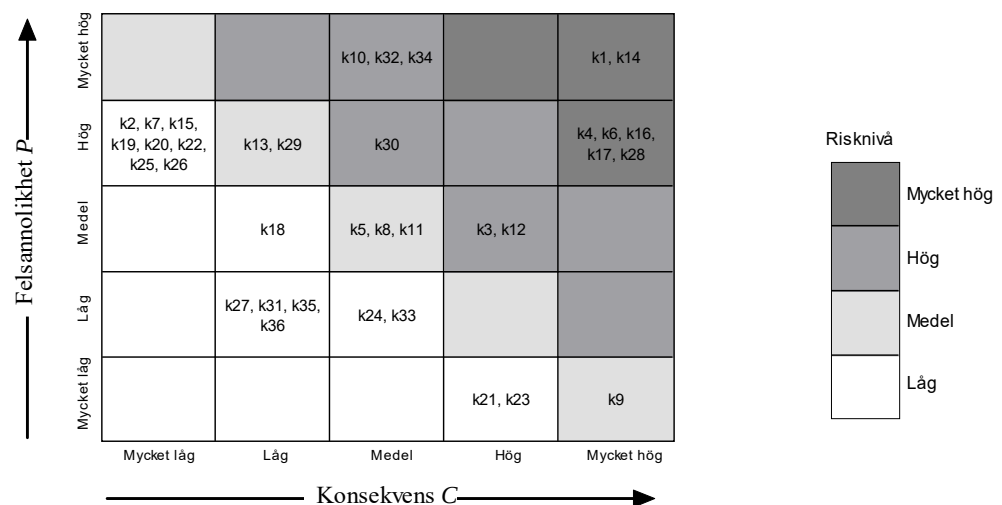
Ibland utförs semi-kvantitativ riskanalys, som ligger i en nivå mellan kvalitativ och kvantitativ analys. En sådan analys karakteriseras av att numeriska värden bestäms för  $C$  och  $P$ , men beräkningen av  $P$  baseras inte på fördelningar som beskriver spridningen för variablerna som ingår i modellen. Analysmetodiken är vanligen relativt grov och inte baserad på fysikaliska modeller, utan baseras på viktsfaktorer samt bedömning av dessa faktorer utifrån erfarenhet och intuition. Den största nackdelen med denna nivå är att inget tidsberoende byggs in i dessa modeller. Arbetsinsatsen för denna typ av analys kan ofta vara mycket nära den för en kvalitativ analys.

##### *Kvalitativ riskanalys*

Riskanalyser utförs ofta med primärt syfte att *identifiera* potentiella faror i ett system, och inte för att bestämma exakta nivåer på riskerna. Denna typ av riskanalys kallas kvalitativ riskanalys. Grundorsaken till fel kan vara komponentfel, operatörsfel eller råvarufel. Vissa risker, framför allt sådana knutna till operatörsfel, kan minskas genom modifiering (eller införande) av instruktioner och säkerhetssystem. Vid analys av operatörsfel kan sannolikheten (och ev. minskning) ofta endast bestämmas baserat på erfarenhet. Riskanalys för identifiering av operatörsfel görs med tekniker som t.ex. HAZOP, WhatIf, eller FMEA, se exempelvis [25].

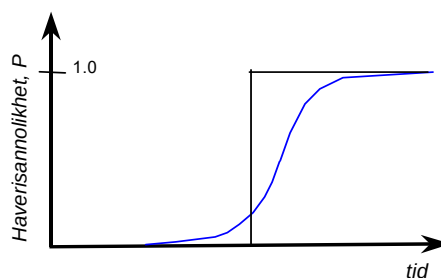
I den första fasen av en RBI-analys används kvalitativ analys för en grov analys av risknivåer i komponenter och system. Felsannolikheten  $P$  och konsekvensen  $C$  för respektive komponent bedöms och placeras in i ett intervall, typiskt finns 2-5 nivåer. I första fasen av en RBI-analys används ofta två nivåer. Bedömningen av nivå för  $C$  och  $P$  görs baserat på erfarenhet, intuition och eventuellt statistik. Figur 1.9-2 illustrerar en utvärdering med 5 nivåer, med en tiopotens i skillnad mellan varje nivå. Intervallet medel för felsannolikheten kan motsvara sannolikheter  $10^{-4}$  till  $10^{-3}$ , och intervallet

mycket hög kan motsvara  $> 10^{-2}$ . Intervallet medel för konsekvensen kan exempelvis motsvara  $0.5 \cdot 10^6 - 5 \cdot 10^6$  SEK, och intervallet mycket låg  $< 50 \cdot 10^3$  SEK. De fyra gråskalorna i figuren motsvarar fyra risknivåer. Notera att övergång mellan olika risknivåer motsvarar diagonala linjer (i figuren snarare trappsteg) om intervallen för  $P$  och  $C$  båda följer en logaritmisk skala (d.v.s. det är en faktor 10 mellan varje nivå). Om  $P$  och  $C$  bedömts på relevant sätt så ska alltså gränsen mellan olika risknivåer utgöra diagonala linjer.



**Figur 1.9-2.** Kvalitativ riskanalys. Nivå för felsannolikhet  $P$  och konsekvens  $C$  bedöms för varje komponent varefter en översikt över systemet kan fås genom att placera in komponenterna i en riskmatris. De fyra gråskalorna i figuren motsvarar fyra risknivåer.

**Figure 1.9-2.** Qualitative risk analysis. Categories of likelihood of failure  $P$  and consequence  $C$  are assessed for each item, resulting in a survey of the system in the form of a risk matrix. The four grey scale levels in the figure correspond to four risk levels.



**Figur 1.9-3.** Med probabilistisk tillförlitlighetsanalys kan livslängden för en komponent beskrivs i form av en haverisannolikhet som beror av drifttid.

**Figure 1.9-3.** Probabilistic reliability analysis results in a representation of the life of a component in term of failure probability as a function of time.

### Kvantitativ riskanalys

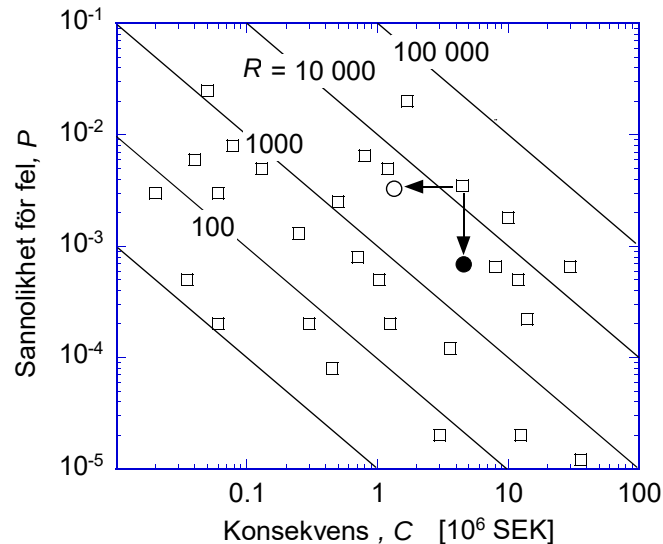
Kvantitativ riskanalys syftar till att beräkna numeriska värden för risknivån för komponenterna i ett system. Livslängden för komponenter beskrivs i form av en haverisannolikhet, som funktion av tiden. Probabilistisk tillförlitlighetsteori används vid beräkningen av  $P$ , och analysen baseras på fysikaliska och empiriska modeller där de ingående parametrarna är mätbara. Sannolikheten  $P$  beräknas baserat på fördelningar som beskriver spridningen för variabler som ingår i modellen. Utseende och spridning för dessa fördelningar måste dock ofta baseras på erfarenhet och intuition, åtminstone i första analysomgången, för att undvika dyrbara mätningar. Konsekvensen  $C$  avseende säkerhet och ekonomi vid komponentfel bestäms genom systemanalys där bl.a. fel- och händelseträd analyseras.

Den stora fördelen med kvantitativa modeller är att tidsberoende kan inkluderas i modellen, jfr. Figur 1.9-3. Detta gör exempelvis att kontrollintervall kan beräknas och optimeras, samt uppdateras. Kvantitativ analys bör användas för system där konsekvens avseende säkerhet eller ekonomi vid fel/haveri är hög. Denna typ av analys är mycket användbar för system där det är viktigt att provning utförs vid rätt tidpunkt, och/eller om underhållsbudgeten är begränsad. Vid optimering av insatser krävs en modell där felsannolikheten vid olika val av inspektionsintervall kan utvärderas.

Figur 1.9-4 illustrerar resultatet från en kvantitativ riskanalys av ett system. Varje rektangel representerar felsannolikheten  $P$  och konsekvens av fel  $C$  för en enskild komponent. Tidsberoende materialdegradering eller spricktillväxt gör att felsannolikheten  $P(t)$  ökar med tiden. Detta innebär att rektanglarna i figuren rör sig uppåt med tiden, alla med olika hastighet. Risknivån för en komponent ges av  $R = P \cdot C$ . Diagrammet i figuren har log-skalar vilket medför att komponenter med samma risknivå ligger längs en diagonal rät linje, se figuren.

Risknivån  $R$  för en komponent kan minskas genom olika insatser. Inspektion och provning ger förbättrad kännedom om komponentens tillstånd, vilket leder till minskning av  $P$ . Detta illustreras med den vertikala pilen och fyllda cirkeln i figuren. Ett komponentbyte eller reparation ger också minskad felsannolikhet  $P$ .

Konsekvenserna vid komponentfel  $C$  kan minskas genom olika typer av ombyggnader av systemet, t.ex. genom ökad redundans eller förbättrade säkerhetssystem. Detta illustreras med den horisontella pilen och den ofyllda cirkeln i Figur 1.9-4. Med kvantitativ analys är det möjligt att bestämma förändringen i risk med tiden eller vid olika åtgärder, och utvärdera planerade insatser.



**Figur 1.9-4.** Kvantitativ riskanalys. Varje rektangel representerar sannolikhet och konsekvens av fel för en komponent. Alla rektanglar rör sig uppåt med tiden, alla med olika hastighet. Risknivån  $R$  för en komponent kan minskas genom: inspektion eller komponentbyte (fyllda cirkeln), eller genom ombyggnad (redundans och säkerhetssystem) som minskar konsekvensen (ofyllda cirkeln).

**Figure 1.9-4.** Quantitative risk analysis. Each rectangle represents the probability and consequence of failure for one component. All the rectangles move upwards as a function of time, all with different speed. The risk number  $R$  of a component can be reduced by: inspection or replacement (filled circle), or by rebuilding (redundancy and safety systems) that reduces the consequence (open circle).

### 1.9.5 Möjligheter och svårigheter med riskbaserad planering

Effektiv metodik för planering av inspektion och provning i anläggningar är nödvändig för att uppnå god ekonomi. Både för att hålla kostnaderna för inspektion och provning, underhåll och utbyten på rätt nivå, men även för att minska och undvika produktionsbortfall.

Tillstånds(konditions)-baserat förebyggande underhåll bör användas för ett antal nyckel-komponenter i en anläggning, medan annan utrustning bör underhållas korrektivt. Att enbart utifrån erfarenhet bestämma hur fördelningen av insatser ska se ut för bästa resultat är dock mycket svårt för en komplex anläggning. Med hjälp av riskbaserad metodik får man stöd för att göra detta systematiskt. Både säkerhets- och ekonomisk risk kan beaktas, och olika beslutsalternativ kan utvärderas samtidigt avseende teknisk livslängd och ekonomi/säkerhet. Planeringen av inspektioner och provning, utbyten och ombyggnader kan därmed optimeras med avseende på ekonomi och säkerhet, och effekten av olika alternativ kan undersökas. Provnings- och underhållsresurserna kan fokuseras rätt och eventuella behov av ökade resurser kan motiveras. Samarbete mellan drift, underhåll och övriga avdelningar stärks genom ett gemensamt övergripande synsätt på hur företaget ska satsa resurser på insatser för bästa långsiktig lönsamhet.

Möjligheter som riskbaserad planering av inspektion och provning ger är sammanfattat:

- Prioritering av provning och åtgärder kan göras baserat på risk, d.v.s. både sannolikhet för fel och konsekvensen av fel vägs in. Ekonomi/säkerhet och livslängd knyts ihop.
- Metoden ger en systematisk genomgång av anläggningen och ger överblick över komplexa system.

Speciella möjligheter vid kvantitativ analys är:

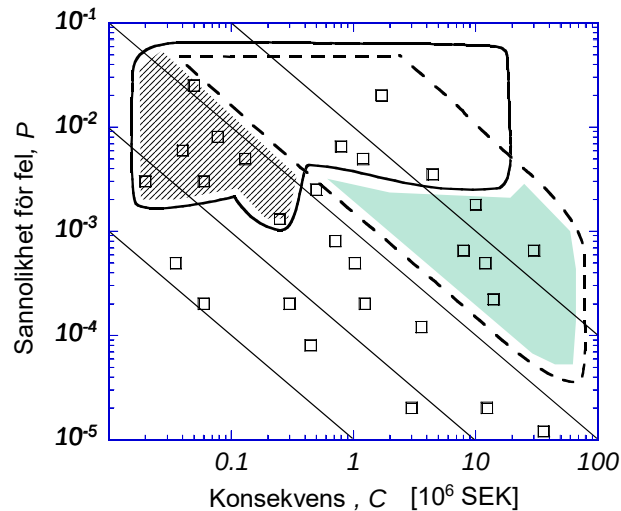
- Risknivån kvantifieras vilket betyder att den relativa betydelsen av olika möjliga fel och olyckssekvenser kan värderas. Den konkreta ändringen i risknivån vid olika åtgärder för olika komponenter kan utvärderas.
- Tidsberoende förändring av risknivån kan beskrivas och utnyttjas. Utgående från modeller för degradering kan kontrollintervall beräknas.
- Risknivån för olika komponenter och system kan jämföras via konkreta siffror, och vid olika framtida tidpunkter. Detta möjliggör att vid rätt tidpunkt och för rätt komponent utföra provning, detaljerad analys av återstående livslängd, och utbyten/reparationer.
- Beräkningen av sannolikheten baseras på mätbara storheter, såsom korrosionshastighet, vilket bidrar till objektivitet och spårbarhet.
- Återkoppling genom att provresultat återförs. Detta gör att träffsäkerheten successivt ökar.
- Planering och urval är tidsberoende och uppdateras ständigt efter insatser. Metodiken gör att insatser dokumenteras och återförs på ett strukturerat sätt.
- Anläggningens framtida totalekonomi (inkluderande driftstopp, komponentutbyten, provningskostnad, etc.) kan analyseras inför en eventuell ändring i: driftförhållanden, byte av material i kritiska komponenter, ombyggnad för redundans, etc.

Svårigheter vid riskbaserad planering är:

- Hantering av data för en stor mängd komponenter.
- Stort behov av detaljerad information, speciellt vid kvantitativ RBI-analys.
- Behov finns av modeller för branschspecifika komponenter och materialdata.
- Analyserna kräver bra samarbete mellan specialister på anläggningens system samt inom tillförlitlighetsanalys, skademekanismer, provning, konsekvensanalys och ekonomi.

Figur 1.9-5 ger ett exempel på skillnaden i urval av komponenter då urvalet baseras på erfarenhet respektive riskanalys. Komponenterna inom den heldragna linjen representerar ett urval baserat på erfarenhet av tidigare händelser, vilket tenderar i en fokusering av inspektion och provning mot komponenter med hög haverifrekvens. Komponenterna inom den streckade linjen representerar ett urval baserat på risknivå. Det erfarenhetsbaserade urvalet missar att identifiera de kritiska komponenterna i det grå området. Komponenterna inom det streckade området motsvarar komponenter med litet riskbidrag som bör uteslutas från förebyggande inspektion och provning. Efter införande av riskoptimerad planering kan således den totala provningsomfattningen i systemet öka, minska eller bli oförändrad, beroende av antalet komponenter inom motsvarande det grå respektive det streckade området.





**Figur 1.9-5.** Komponenturval för inspektion och provning. Komponenterna inom den heldragna linjen representerar ett exempel på urval baserat på erfarenhet, och komponenterna inom den streckade linjen representerar ett urval baserat på risknivå. Erfarenhetsbaserat urval missar att identifiera de kritiska komponenterna i det grå området, och inkluderar komponenter inom det streckade området med litet riskbidrag.

**Figure 1.9-5.** Selection of components for inspection and testing. The components inside the continuous line represent a selection from experience, and the components inside the broken line represent a selection based on risk numbers. The experience based selection fail to identify the critical components in the grey area, and includes the components in the dashed area with small contribution to the risk.

#### 1.9.6 Arbetssteg i en RBI-analys

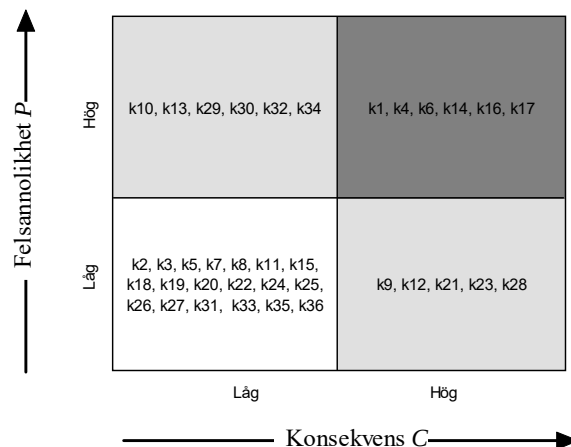
Riskbaserad planering är en metodik för systematisk och strukturerad prioritering av aktiviteter genom samtidig utvärdering av felsannolikhet och konsekvens. Riskbidrag p.g.a. operatörsfel kan motsvara en fix sannolikhet för felfunktion i ett system. Här diskuterar vi primärt planering av förebyggande arbete med komponenter. Indirekt kan dock ibland operatörsfel inkluderas vid systemanalysen och beräkningen av konsekvens. Riskbaserad planering av förebyggande inspektion och provning för komponenter utsatta för degradering motsvarar en samtidig utvärdering av komponentlivslängd och konsekvens.

Riktlinjer och rekommendationer för RBI har utvecklats i vissa branscher, se exempelvis [13, 14] för kärnkraftsindustrin och [15-19] för övrig industri. Flera av dokumenten beskriver främst semi-kvantitativa metoder.

Vid kvantitativ RBI-analys bestäms risknivån för komponenterna i ett system vid en viss tidpunkt och för ett visst val av inspektionsinsats. För att beräkna reduktionen av risknivå förknippad med insatsen beräknas risknivån för varje komponent både före och efter den eventuella åtgärden. Delsteg i en *kvantitativ RBI-analys* är:

- 1) Grov kvalitativ bedömning av sannolikhet och konsekvens av fel. Komponenterna i de olika systemen placeras in i intervall, jfr. Figur 1.9-6. Baserat på denna grova riskanalys väljs kritiska system och komponenter ut för fortsatt analys.
- 2) Identifiering av verkande skademekanismer i systemet under normala driftförhållanden och vid förväntade störningar, baserat på historik, miljödata och prover.
- 3) Identifiering och sammanställning av förväntade överlastar (yttre händelser).
- 4) Identifiering av händelser som leder till fel – driftstopp; exempelvis större läckage, otillräcklig pumpverkan, obalans eller brott. Flera händelser (ev. med olika konsekvens) kan definieras för varje komponent.
- 5) Beräkning av sannolikheten för komponentfel som funktion av tiden, baserat på materialdegradering, förväntade belastningar samt provningsresultat, se **avsnitt 1.9.7**.
- 6) Beräkning av konsekvenser (säkerhet, eller kostnader för produktionsbortfall, sanering, reparationer och provning) genom analys av systemet, se **avsnitt 1.9.8**.
- 7) Provningsoptimering och eventuell analys vid ändringar i driftdata, se **avsnitt 1.9.9** och **1.9.10**.

Eftersom analyserna innefattar en stor mängd komponenter och information är det viktigt med ett bra programsystem för systematisk och överskådlig hantering av data.



**Figur 1.9-6. Riskmatrix för inledande översiktlig analys av risknivå för komponenterna i ett system.**

**Figure 1.9-6. Risk matrix for initial screening of the risk level of the components in the system.**

### 1.9.7 Bestämning av sannolikhet för komponentfel

Sannolikheten för komponentfel  $P$  kan uppskattas baserat på erfarenhet, utifrån statistik eller genom probabilistisk tillförlitlighetsanalys. En rad degraderingsmekanismer verkar i en anläggning, och skadetillväxten beror av driftförhållanden och gångtid. Detta innebär att felsannolikheten  $P$ , och risknivå  $R$ , för varje komponent i allmänhet är tidsberoende. Störst möjligheter till optimering av inspektionsintervall fås därmed om  $P$  kan beskrivas som funktion av tiden, d.v.s. vid kvantitativ analys.

### 1.9.7.1 Statistik för komponentfel

För vanligt förekommande komponenter med någorlunda hög haverifrekvens kan bedömningar utifrån statistik förväntas ge bra resultat. Haverifrekvenser för mekaniska komponenter i kärnkrafts- och offshoreanläggningar ges exempelvis i [21-23]. Branschvisa databaser med hög grad av specifikation av påkänning och miljö ger en bra grund för detta angreppssätt. En nackdel vid bestämning av  $P$  från statistik är att inget tidsberoende fås. Upprättande av branschdatabaser med detaljerad registrering av drifttid och driftförhållanden hjälper till att systematiskt fånga upp erfarenheter samt dokumentera och sprida dessa.

Bedömning baserad på statistik har låg noggrannhet för fallen: icke-standard-komponenter, långa livslängder eller vid för branschen ovanlig miljö. I dessa fall krävs beräkning genom probabilistisk modellering. En viktig användning av branschstatistik är för kalibrering och verifikation av probabilistiska degraderingsmodeller.

### 1.9.7.2 Probabilistisk tillförlitlighetsanalys

I detta avsnitt beskrivs principer för beräkning av sannolikheten för komponentfel  $P$  som funktion av tid, baserat på metoder för probabilistisk tillförlitlighetsanalys, brottmekanik och modeller för degraderingsmekanismer. De två faktorer som främst styr utvecklingen för sannolikheten för komponentfel  $P$  är:

- degraderingshastigheten under de rådande driftförhållandena,
- den använda provningsmetodikens förmåga att följa och avgöra omfattningen av de verkande skademekanismerna (innan fel/haveri uppstår).

Då sannolikheten för fel  $P$  beräknas baserat på materialdegradering, förväntade överlaster och provningsresultat, utförs följande steg:

- 1) Identifiering av verkande skademekanismer i systemet (t.ex. korrosion, krypning, eller sprickbildning), se **kapitel 1.5**. Detta utförs genom analys av historik, miljödata, metallografiska undersökningar och provning.
- 2) Förutsägelse av degraderingshastigheter, baserat på material/miljö samt påkänning (spänning, temperatur och flödes hastighet). Konservativa antaganden eller mätningar kan behövas.
- 3) Bestämning av händelser som innebär felfunktion eller haveri för komponenten/systemet, vid normaldrift eller kända möjliga överlaster. Exempelvis stort läckage av medium eller rörbrott. Flera händelser (ev. med olika konsekvens) kan definieras för varje komponent. Detta görs i samspel med konsekvensbedömningen.
- 4) Insamlande av resultat och tidpunkter för tidigare provning på komponenten.
- 5) Bestämning av komponentens nuvarande gångtid (och möjliga tidpunkter för utvärdering).
- 6) Bedömning av effektiviteten för tänkbara provningsmetoder.
- 7) Beräkning av sannolikheten för komponentfel,  $P$ . Detta beskrivs mer detaljerat nedan.

### Beräkning av sannolikheten för fel $P$

Baserat på materialegenskaper, haverimekanismer eller funktionskrav bestäms ett felvillkor  $g(z)$  för respektive typ av komponent. Haveri kan uppkomma genom exempelvis (ofta kombinationer) plastisk kollaps, brott, buckling, överbelastning,

miljöändring, spricktillväxt eller korrosion (jfr **kapitel 1.5** och **kapitel 1.8**). Funktionsfel kan exempelvis bestå av ett läckage av kritisk storlek via en genomgående (men stabil) spricka eller via en rostgrop genom tryckbärande gods. Tillräcklig funktion kan även upphöra om ett glapp/utböjning i en komponent överstiger ett visst värde, t.ex. på grund av erosion eller slitage.

För att kunna tillämpa kvantitativ metodik på kraftvärmeverk behövs data till modeller för de skademekanismer som är aktuella. Detta innebär att ett visst behov av utveckling av modeller och bestämning av data för de miljöer som råder i olika typer av kraftvärmeverk kan behövas. Exempel på ett driftsfall som kan vara viktigt att inkludera är längre och kortare avställningar, där konserveringsmetodik kan ha stor inverkan på korrosion.

Det första steget är således att ta fram relationer som beskriver haveri/felvillkor samt tidsberoende degradering. Dessa relationer skrivs som ett villkor  $g(z) = 0$ . Flera fel/haverivillkor eller skademekanismer kan förekomma för en komponent, varvid en relation blir styrande, beroende av aktuell last och miljö. Nästa steg är att beskriva och inkludera spridning och variation i de ingående variablerna. Till detta används probabilistisk tillförlitlighetsanalys.

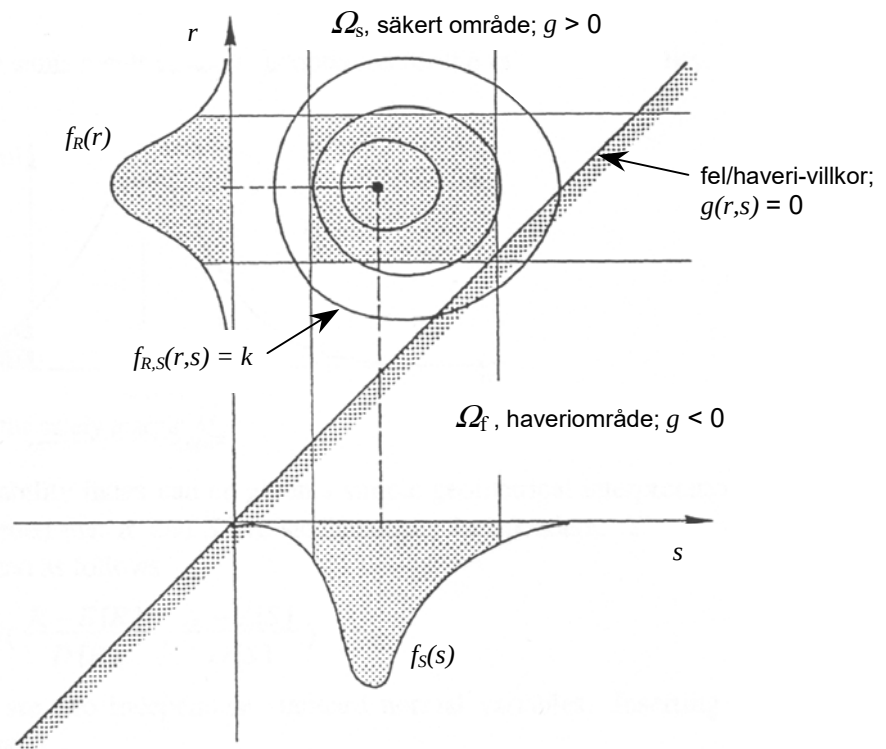
Sannolikheten för fel beräknas genom att den s.k. simultana täthetsfunktionen  $f_Z(z)$  integreras över området där felvillkoret  $g(z) < 0$  (se Figur 1.9-7)

$$P = \int_{g(z) < 0} f_Z(z) dz = \int_{\Omega_f} f_{1,\dots,n}(x_1, \dots, x_n) d\Omega = 1 - \int_{\Omega_s} f_Z(z) d\Omega \quad (1.9.2)$$

där  $Z$  är en vektor med de  $n$  stycken (stokastiska) variabler  $x_i$  som beskriver problemet. Områdena  $\Omega$  och  $\Omega_s$  definieras i Figur 1.9-7. Spridningen för varje enskild variabel  $x_i$  kan beskrivas med en täthetsfunktion  $f_i$ . De enskilda fördelningarna för de ingående variablerna,  $f_i$ , antas kända. Variablernas spridning beskrivs exempelvis med en fördelning av typ normal, lognormal, Weibull, eller exponentiell, se t.ex. [2]. I många fall kan man visa att inverkan av spridningen för vissa variabler i modellen är mycket liten, varvid dessa variabler kan behandlas deterministiskt. I fallet då alla ingående variabler är oberoende av varandra ges den simultana täthetsfunktionen av produkten  $f_Z(z) = \prod f_i(x_i)$ . Tillförlitligheten för komponenten definieras av  $R = 1 - P$ .

Integralen ovan är i allmänhet  $n$ -dimensionell och kan endast beräknas numeriskt. Detta är ett komplicerat problem bl.a. eftersom felsannolikheten  $P$  vanligen är liten och det därför krävs mycket hög noggrannhet i beräkningen. För att göra detta effektivt med rimliga beräkningstider används olika approximativa metoder som FORM och MonteCarlo-simulering, se t.ex. [2, 4, 5].

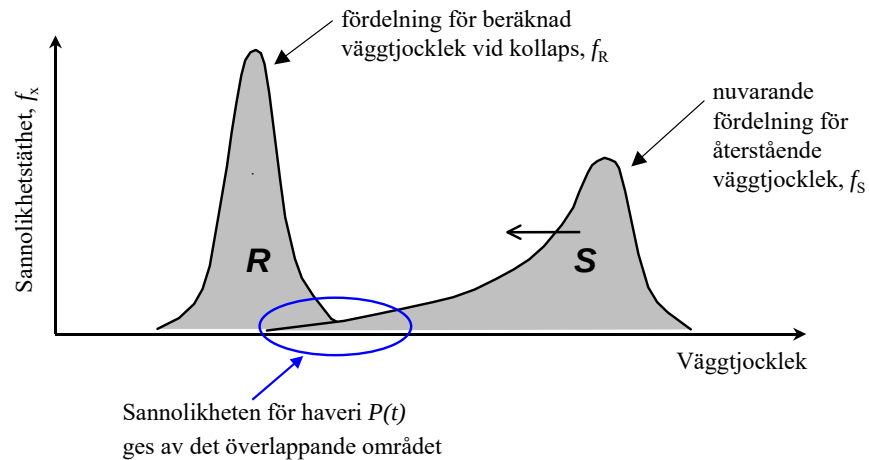
Tidsberoendet på grund av skademekanismer modelleras genom att förändringen i medelvärde och spridning för de variabler i haverivillkoret  $g(z)$  som påverkas av degraderingen beskrivs med aktuella modeller, jfr. kapitel 1.5. Integralen över haveriområdet  $\Omega$  i Figur 1.9-7 beror därigenom av vilken framtida tidpunkt som utvärderas.



**Figur 1.9-7.** Illustration av en komponent som beskrivs av två variabler och haverivillkoret  $g(r,s) = 0$ . Aktuell fördelning för variablerna  $s$  respektive  $r$ , samt den simultana täthetsfunktionen  $f_{R,S}$  visas. Sannolikheten för fel  $P$  ges av integralen över haverivillkorets område,  $\Omega_f$ . Skademekanismer gör att fördelningen av  $s$  och  $r$ , eller haverivillkoret  $g$ , förändras.

**Figure 1.9-7.** Illustration of a component described by two variables and a criterion (limit state)  $g(r,s) = 0$ . The distributions of the variables  $s$  and  $r$ , and the total density function  $f_{R,S}$  are shown. The failure probability  $P$  is given by the mass inside the failure region,  $\Omega_f$ . Damage mechanisms result in change of the distributions  $s$  and  $r$ , or the failure criterion  $g$ .

En illustration av tidsberoende felsannolikhet  $P(t)$  för en komponent ges med Figur 1.9-8. Vi studerar ett förenklat fall av ett rör (godstjocklek  $h_0$ , medelradie  $R_m$ ) under tryck  $p_t$  och utsatt för degradering enbart genom allmänkorrosion med korrosionshastigheten  $v$ . Röret är gjort av segt material med sträckgräns  $\sigma_y$  och havererar genom plastisk kollaps. Vi väljer att beskriva problemet som funktion av väggstjocklek, eftersom denna parameter är direkt mätbar under drift för uppdateringar. Väggstjocklek vid kollapslast  $r$  kan beräknas som  $r = p_t R_m / \sigma_y$ . Spridningen i materialdata och tryckbelastningen ger en fördelning  $f_R$  enligt figuren nedan. Degraderingen ger att nuvarande väggstjockleken ges av  $s = h_0 - vt$ , där  $t$  är rörets drifttid. Fördelningen för den predikterade nuvarande väggstjockleken,  $f_s$ , beror av senaste mätning av godstjocklek (mätprecision, täckning, tid till senaste mätning) och spridning i korrosionsdata och/eller kännedom om miljön. Haverivillkoret är  $r - s = 0$ . Sannolikheten  $P(t)$  kan sägas motsvara det överlappande området mellan fördelningarna. Fördelningen  $f_s$  breddas och förflyttas mot minskande väggstjocklek med tiden, vilket medför att sannolikheten  $P$  för haveri/läckage ökar med tiden.



**Figur 1.9-8.** Tidsberoende sannolikhet för komponentfel  $P(t)$ . Exemplet illustrerar allmänkorrosion av ett trycksatt rör. Fördelningen  $f_S$  ändras mot minkande vägg tjocklek med ökande drifttid.

**Figure 1.9-8.** Time dependent failure probability  $P(t)$ . The example illustrates uniform corrosion of a pressurised ductile pipe. The density function  $f_S$  will change towards thinner wall thickness as operating time increase.

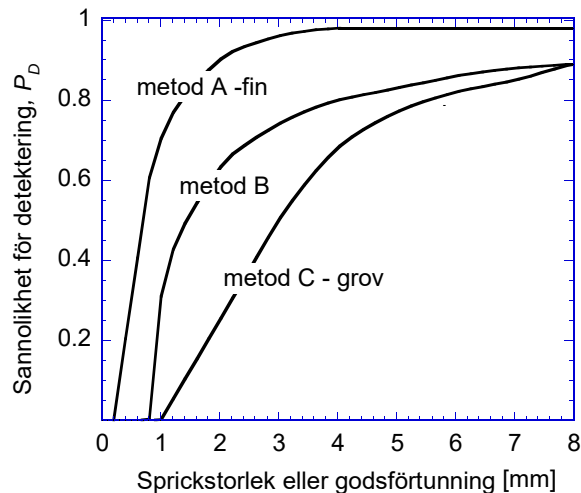
#### 1.9.7.3 Provningsmetoders effektivitet

Valet av provningsteknik ingår som del i optimeringen av provningsplanen och påverkar intervallen. En översikt över olika oförstörande provningsmetoder ges i **kapitel 1.6**. Den inspektionsteknik som krävs beror av nödvändig effektivitet och av aktuell skademekanism. Valet av metod inkluderar även arbetssätt och detaljerad specificering av mätpositioner och täckningsgrad.

Olika provningssystemers förmåga att detektera olika typer av degradering brukar beskrivas med kurvor liknade de i Figur 1.9-9. Exempelvis kan kurvan för metod A motsvara magnetpulverprovning (MT) för sökning efter ytsprickor utförd med hög noggrannhet och täckning, metod B kan motsvara noggrann penetrantprovning (PT), och metod C kan motsvara noggrann visuell avsyning av yta.

För analyserna används även kurvor som beskriver provningseffektiviteten för en given provningsmetod beroende på hur den utförs. Kurvorna i Figur 1.9-9 kan exempelvis motsvara olika förfining av utrustning och täckning vid godstjocklekmätning genom ultraljudprovning.

Uppdatering och hänsyn till osäkerhet från provningen vid beräkningen av  $P$  kan göras på flera olika sätt, se t.ex. [2].



**Figur 1.9-9.** Illustration av kurvor som beskriver olika provningssystemets förmåga att detektera degradering.

**Figure 1.9-9.** Illustration of curves describing the capability of detection of degradation for different inspection systems.

#### 1.9.8 Beräkning av konsekvensen då fel inträffar

Viktiga faktorer för konsekvensen  $C$  vid ett fel är:

- Farliga ämnen eller energiansamlingar i systemet, vilket ofta avgör säkerhetskonsekvenserna av felet.
- Varaktigheten för produktionsstopp vid åtgärdande av felet. Detta påverkar ofta starkt den ekonomiska konsekvensen.
- Säkerhetssystem och givare som hjälper till att upptäcka fel och minska följderna vid fel, samt växelverkan mellan komponenter i systemet om fel uppstår.

Vid beräkning av konsekvensen vid komponentfel utförs följande delmoment:

- 1) Definition av händelser som innebär komponentfel/haveri vid normaldrift eller möjliga överlastar. Detta görs i samspel med sannolikhetsanalysen för bestämning av haverivillkor.
- 2) Indelning av systemet i områden med samma konsekvens. Komponenter med likartade inledande händelse (t.ex. stort läckage av kylmedium) och säkerhetssystem kan ofta grupperas och tilldelas samma konsekvens.
- 3) Systemanalys med händelseträd för att bestämma hur redundans och säkerhetssystem påverkar (minskar) sannolikhet för de olika alternativa konsekvenserna.
- 4) Beräkning av konsekvens  $C$ ; beräkning av kostnaderna efter olika händelseförlopp samt bestämning av säkerhetskonsekvens, i form av sannolikhet för personskada/dödsfall och utsläpp.



Dessa moment beskrivs mer i detalj nedan.

#### *Identifiering av händelser som innebär felfunktion hos komponenten*

Bestämning av händelser som innebär komponentfel/haveri är ett mycket viktigt inledande steg vid kvantitativ riskanalys. Det gäller att identifiera händelser i komponenten som kan utvecklas till en betydande oönskad konsekvens i anläggningen. Händelsen beror här på skademekanismer och/eller hög påkänning. Flera händelser (ev. med olika konsekvens) kan definieras för varje komponent. Händelsen sätter systemets funktion ur spel, ger driftstopp och/eller medför stor fara. Händelsen kan exempelvis vara brott, större läckage som äventyrar systemets kylning, otillräcklig pumpverkan, knäckning av del i lastbärande struktur, eller läckage av brandfarligt ämne, orsakat av degradering och/eller förekommande driftstörningar. Händelser som innebär komponentfel definieras i växelverkan med sannolikhetsberäkningen för definition av haverifunktioner  $g(z)$ .

Den förväntade konsekvensen då komponentfel inträffar kan vara ekonomisk förlust eller person- och miljöskador. För att kunna utföra riskbaserad utvärdering måste konsekvenserna  $C_i$  vid fel i systemet kvantifieras. Konsekvenserna då en händelse sätter systemets funktion ur spel kan primärt indelas i säkerhetskonsekvens  $C_s$  och ekonomisk konsekvens  $C_e$ .

#### *Person- och miljösäkerhetskonsekvens*

Säkerhetskonsekvenser vid fel uttrycks normalt i form av sannolikhet för dödsfall eller personskada per år, eller utsläppsvolym per år. Uppskattning av sannolikhet för dödsfall vid olika händelser kräver god kännedom om anläggningen. Konsekvensen påverkas av faktorer som: läckagestorlek, temperatur, brand, explosion, utrymningsmöjligheter, skydd, etc. Miljörisk beskrivs ofta som utsläppt mängd av giftigt ämne i ton eller  $m^3$  per år.

Risker kan bara jämföras om de är baserade på samma typ av konsekvens. Person- och miljökonsekvens räknas ibland om till kostnad i kronor, ekonomisk konsekvens. En sådan värdering är givetvis subjektiv och kontroversiell. (Kostnad för dödsfall brukar ofta värderas till i storleksordningen 10 MSEK.) Den stora fördelen med att använda kostnad som mått på konsekvensen är att det alltid är möjligt, dock inte alltid trovärdigt, att bestämma eller tillskriva en kostnad till alla typer av händelser.

#### *Ekonomisk konsekvens*

Huvudbidragen till kostnader efter olika händelseförlopp utgörs vanligen av:

- kostnad p.g.a. produktionsbortfall under stillestånd samt avstängning/uppstart,
- material och personalkostnad vid reparation och komponentbyte,
- saneringskostnader,
- skadlig publicitet

Storleken beror givetvis av det sluttillstånd systemet hamnar i. Se illustration i Figur 1.9-4. Konsekvensen kan påverkas av faktorer som: effektiviteten hos automatiska avstängningssystem, operatörshandlande, läckagestorlek, medium, sannolikhet för antändning, barriärer, etc.

För att måttet risk ska fungera som parameter vid optimeringen är det mycket viktigt att alla kostnader förknippade med ett komponentfel/haveri tas med.

### Systemanalys

För att bestämma konsekvensen  $C$  då komponentfel inträffar krävs analys av säkerhetssystem och komponenternas växelverkan. En effektiv konsekvens tillhörande ett enskilt komponentfel kan bestäms genom analys av hur säkerhetssystem och redundans påverkar (minskar) sannolikhet för de möjliga konsekvenserna. Arbetet kan vanligen begränsas genom att systemen indelas i områden med samma konsekvens.

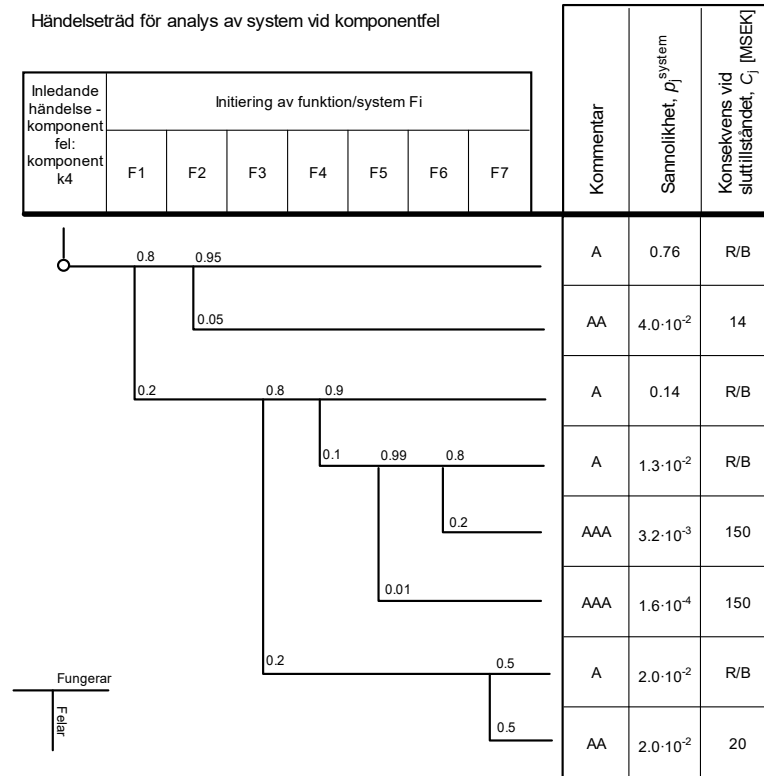
Effekten av ett inledande komponentfel i systemet analyseras med hjälp av händelseträd (ibland även kallat konsekvensträd), se Figur 1.9–10. Systemets säkerhetsfunktioner och detektorer utvärderas för att bestämma konsekvensen vid komponentfel. Händelseträdet åskådliggör och systematiserar olika kedjor av händelser som kan inträffa i anläggningen och beskriver olika konsekvenslindrande system. Sannolikheten för fel i dessa funktioner uppskattas vanligen utifrån erfarenhet eller med statistiska feldata. I fallen i Figur 1.9–10 där konsekvensen blir R/B består kostnaden enbart i kostnad för reparation eller byte av komponent. Detta innefattar kostnader för material, personal, tid för produktionsstopp, ställningsbyggande, etc. För dessa fall sker en kontrollerad avstängning av systemet utan följdskador på andra delar.

En effektiv konsekvens kan beräknas för en komponent enligt

$$C = \sum_j C_j p_j^{\text{system}} \quad (1.9.3)$$

där de alternativa möjliga konsekvenserna  $C_j$  vid händelsen beror av säkerhetsfunktionernas respons och sannolikheten  $p_j^{\text{system}}$  att systemet hamnar i motsvarande tillstånd, jfr. Figur 1.9–10. Andra metoder att utvärdera system och händelseträd beskrivs t.ex. i [26].

Om den analyserade komponenten har flera parallella komponenter (eller system) kan funktionen upprätthållas och den effektiva konsekvensen mildras därmed genom s.k. redundans. Antag att den studerade komponenten har  $M$  identiska parallella (oberoende) komponenter med felsannolikhet  $p_k$ , var och en ensam med tillräcklig kapacitet för att upprätthålla produktionen. Systemet stannar först om alla dessa komponenter havererar. Sannolik konsekvens vid komponentfel kan i detta fall minskas till  $C/(p_k)^M$  då hänsyn till redundansen tas.



F1 = avstängning av systemet efter signal från enbart givare xy  
 F2 = nödkylventil öppnar  
 F3 = etc.

**Figur 1.9–10. Exempel på händelseträd för analys av ett systems detektorer och säkerhetsfunktioner för att bestämma konsekvensen vid komponentfel.**

**Figure 1.9–10. Example of an event tree for analysis of the consequence of component failure depending on the detectors and safety functions of a system.**

### 1.9.9 Riskbaserat urval och optimering

#### Riskkriterier

Acceptabla risknivåer regleras ibland av myndigheter men för en stor del av utrustningen i en anläggning är detta en strategifråga för anläggningsägaren. Även försäkringsbolag kan ställa krav på risknivåer för reduktion av premier. Ibland sätts riskkrav på enstaka utrustning eller komponent, medan kravet ibland ställs på total risknivå för ett helt system. Säkerhetsrisk kan tolkas som "sannolikhet för skada" per år på miljö eller person. Ekonomisk risk kan beskrivas som "sannolikhet för kostnad per år".

En acceptabel miljörisknivå brukar sägas vara en som motsvarar att tiden för återhämtning efter ett utsläpp är försumbar jämfört med den förväntade perioden mellan sådana utsläpp. En liten miljöskada sägs ofta återhämta sig inom 1 år, medan en allvarlig miljöskada är en skada där återhämtningen tar mer än 10 år. Den acceptabla miljörisknivån  $R^m$  ovan tolkas ibland som att en liten miljöskada, med återhämtning inom 0.5 år, tillåts inträffa högst en gång vart 10 år. Detta motsvarar att allvarligare

miljöskada får inträffa högst en gång per 400 år. Ofta anges gränser i ton/år för utsläpps som medför stor fara.

I offshoreanläggningar arbetar man ofta med en acceptabel personsäkerhetsrisk motsvarande  $< 25$  FAR (Fatal Accident Rate). Detta betyder  $< 25$  dödsfall per 100 miljoner arbetstimmar, eller  $< 2.2 \cdot 10^{-3}$  dödsfall/år. I branscher med färre faror kan acceptabla risknivåer för personsäkerhet  $R^p$  ofta motsvara:  $1 \cdot 10^{-4}$  dödsfall/år vid medelnivå (jfr Figur 1.9-2),  $> 5 \cdot 10^{-2}$  vid mycket hög risknivå, och  $< 5 \cdot 10^{-5}$  vid mycket låg risknivå. Acceptabel risknivå avseende säkerhet kan ibland tillåtas variera mellan olika system i en anläggning genom att särskilda säkerhetsåtgärder vidtas för komponenter och områden som identifierats som farliga.

Kriteriet vad gäller ekonomisk risknivå är alltid den risknivå  $R^e$  som ger minimerad totalkostnad för systemet eller anläggningen. I bland kan jämförelse göras med en alternativ investering. Det ska påpekas att i många fall minskar ekonomisk- och säkerhetsrisk samtidigt vid åtgärder.

Ovanstående villkor är uttryckta i absoluta risknivåer. Vid förbättring inom ett befintligt system fungerar det mycket bra att använda relativ riskändring som mått  $\Delta R/R$ . Ett mål kan exempelvis vara att förbättra ekonomin vid oförändrad säkerhetsrisk för systemet,  $\Delta R^s = 0$ , genom optimering av provning. Med detta relativa synsätt kan man slippa specificera nivån. Om flera skilda anläggningar ska jämföras, exempelvis vid upphandling av ny design eller vid bedömning av myndigheter, behövs dock i allmänhet specificering av krav genom absolut risknivå.

#### *Prioritering baserat på risk*

Avseende säkerhetsrisk är grundprincipen att ständigt prioritera insatser för de komponenter som ligger högst i risknivå. När det gäller ekonomisk risknivå måste dock alltid kostnaden för åtgärden vägas in vid prioritering, om inte denna uppenbart är betydligt lägre.

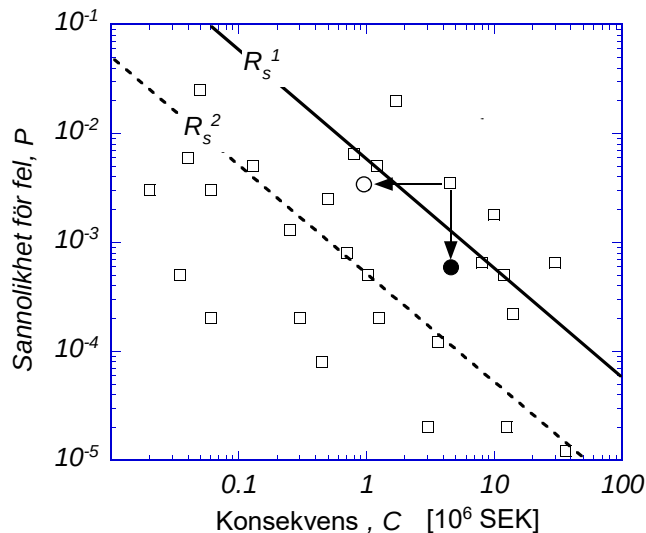
Komponenterna i ett system kan placeras in i ett riskdiagram likande det i Figur 1.9-11. Konstant risknivå  $R$  utgörs av diagonaler i figuren. Det är viktigt att alla bidrag till konsekvens fås med på ett riktigt sätt vid beräkningen av  $C$ . Detta är en förutsättning för att gränser mellan olika risknivåer ska utgöra räta linjer, vilket antas vid användandet av riskkriterier. Det är även viktigt att genomföra känslighetsanalyser avseende de parametrar och fördelningar som man erfarenhetsmässigt vet har avgörande betydelse för  $P$ .

En anläggningsägare kan exempelvis använda strategin att alla komponenter ska åtgärdas så att de underskrider en absolut risknivå avseende säkerhet,  $R_s^1$ . För att få ett visst inslag av förutsättningslöst undersökande av systemet kan ägaren även bestämma sig för en ytterligare lägre nivå,  $R_s^2$ , ned till vilken exempelvis 10 % av komponenterna provas, med ett slumpmässigt urval.

För komponenter där flera olika händelser eller skademekanismer kan innebära och leda till fel beräknas en effektiv komponentrisk. Risknivån för en komponent beräknas genom att sannolikhet och konsekvens motsvarande var och en av dessa händelser summeras enligt

$$R = \sum_k P_k C_k, \quad k = 1, \dots, m, \quad (1.9.4)$$

, där  $m$  är antalet olika identifierade händelser som leder till felfunktion för komponenten. Hänsyn till eventuell redundant verkan mellan komponenter är inkluderad om beräkningen av konsekvensen  $C$  utförts enligt beskrivningen i avsnitt 1.9.8.



Figur 1.9–11. Representation av komponenterna i ett system vid kvantitativ riskanalys. Två risknivåer har lagts in i diagrammet.

Figure 1.9–11. Representation of the items of a system at quantitative risk analysis. Two risk levels are put up in the diagram.

Totala risknivån för ett system kan (konservativt) beräknas som summan av risknivån i var och en av systemets  $N$  komponenter.

$$R = \sum_{i=1,N} R_i \quad (1.9.5)$$

Ekonomisk optimering utförs genom att den förväntade totalkostnaden/år minimeras. En sådan optimering medför normalt att komponenter med hög ekonomisk risknivå åtgärdas. Här vägs dock alltid kostnaden för insatsen in. Vanligen är det lämpligt att räkna om kostnaderna till nuvärden vid analysen. Minimum söks för totalkostnaden under variation av provningsintervall  $\Delta T$  och provningsmetod  $q$ . För en komponent kan vi skriva

$$\min_{\Delta T, q} \{ R^e(\Delta T, q) + E_a(\Delta T, q) \} \quad (1.9.6)$$

där  $R^e$  är den beräknade ekonomiska risken för komponenten, och  $E_a$  är kostnaden för insatsen. Vid provning innefattar  $E_a$  kostnader för personal, hyra av utrustning, (ev. fördelad) kostnad p.g.a. produktionsstopp, ställningsbyggnad, avisolering, etc.

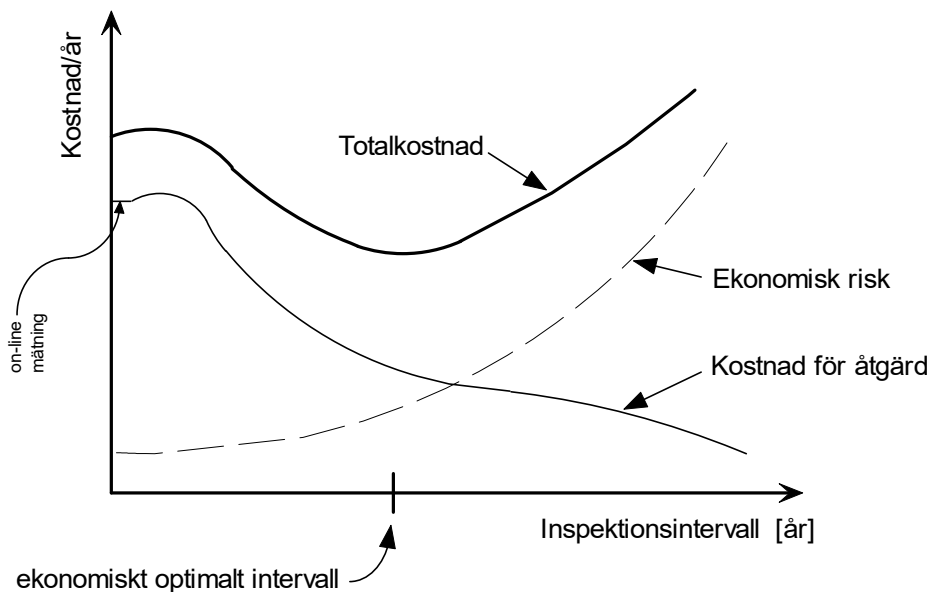
Vid optimering av provningsintervallen för alla komponenter i ett system blir problemet betydligt mer komplext, se t.ex. [7, 9]. Tidpunkter för planerade avställningsstopp och krav på risknivån avseende säkerhet ger dessutom tvångsvillkor

på intervallen. För ett system med  $N$  komponenter kan man över lämplig tidsperiod (systemets livslängd) söka

$$\min_{\Delta T_i, q_i} \left\{ \sum_i \left( R_i^e(\Delta T_i, q_i) + E_{ai}(\Delta T_i, q_i) \right) \right\} \quad (1.9.7)$$

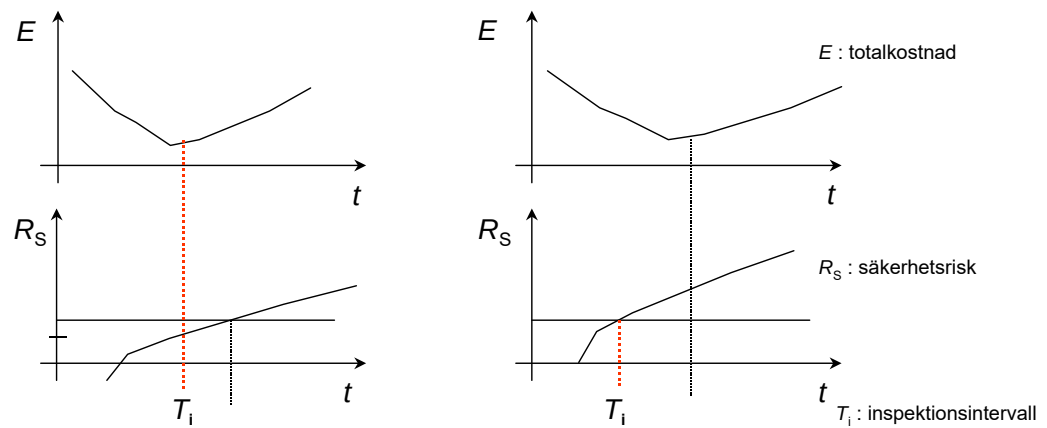
Figur 1.9–12 visar ett exempel på ekonomisk optimering av kontrollintervall för en komponent. Minimum söks för summan av inspektionskostnad och ekonomisk risk. Inspektionskostnaden inkluderar kostnader för ställningsbyggande, avisolering, ev. avstängningstid, etc. Ekonomisk risk vid ett givet inspektionsintervall är den förväntade kostnaden per år p.g.a. produktionsbortfall, reparationer, goodwill, etc.

Figur 1.9–13 illustrerar optimering med villkor på risknivån avseende säkerhet. Säkerhetsrisken minskar vanligen monotont med kortare inspektionsintervall. På komponent-nivå kan man ofta utnyttja att säkerhetsrisken  $R_s$  sänks, eller bibehålls, om sannolikheten för haveri  $P$  sänks. Fall 1 i figuren innebär att ekonomiskt optimum medför att även säkerheten förbättras. I fall 2 begränsar säkerhetsnivån och ekonomiskt optimum kan inte nås.



Figur 1.9–12. Ekonomiskt optimalt provningsintervall för en komponent.

Figure 1.9–12. Cost optimum inspection interval for a component.

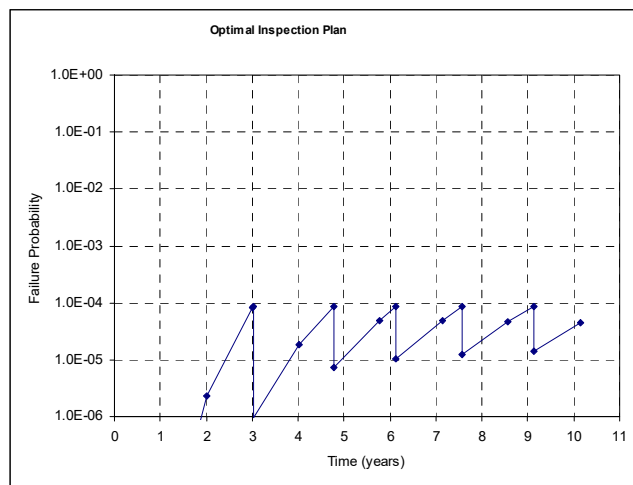


Fall 1: ekonomiskt optimum ökar även säkerhet

Fall 2: ekonomiskt optimum nås ej, säkerhetsnivå begränsande

Figur 1.9–13. Tid till provning för en komponent. Ekonomiskt optimum bestämmer inspektions-intervall i fall 1, medan krav på nivån för säkerhetsrisk begränsar i fall 2.

Figure 1.9–13. Time to inspection for a component. In case 1 the interval is settled by cost optimum, but in case 2 the interval is limited by a safety level requirement.



Figur 1.9–14. Uppskattad felsannolikhet som funktion av drifttid med uppdateringar efter information från provningar.

Figure 1.9–14. Failure probability as a function of operating time. The probability is updated based on the inspection results.

#### 1.9.10 Återföring av provningsresultat och uppdaterad planering

En riskbaserad modell av anläggningen leder till att erfarenheter från provning och drift kan systematiseras och lagras. Uppdatering av komponenturval och inspektionsintervallen kan ske efter varje åtgärd som tillför nya data. Metodik för uppdatering beskrivs exempelvis i [2, 6]. Provning ger förbättrad kännedom om tillståndet i komponenterna, vilket medför att inspektionsintervallen kan beräknas mer exakt. Planering och urval blir alltså tidsberoende och uppdateras ständigt efter insatser. Utifrån provningsresultaten fås även en indirekt uppmätning av t.ex.



korrosionshastigheter i den rådande miljön. Återkopplingen gör ökad precisionen vid beräkningen av återstående livslängd och därmed ökar träffsäkerheten i prioriteringen av åtgärder successivt.

Figur 1.9–14 visar felsannolikhet (eller risk) som funktion av drifttid för en komponent med uppdateringar efter information från provningar. Med flexibla provningsintervall och uppdatering kan risknivån hållas vid en fix nivå. Då ett system blir äldre ökar riskerna snabbt. Med denna metodik har man större möjlighet att matcha provningen mot detta. Då komponenten når kritisk risknivå byts den ut eller renoveras.

#### 1.9.11 Stöd vid investeringsbeslut – kostnads/nytta-analyser

RBI kan även användas i en större helhet som ett verktyg för stöd i beslut och investeringar i anläggningen. Med dessa metoder kan både provningsomfattning, framtida ombyggnader, materialval, utbyten och driftsätt utvärderas och optimeras. Programsystem för RBI-analys innehåller ibland verktyg för detta.

#### 1.9.12 Tillämpningar och praktiska tillvägagångssätt

Riskbaserade metoder för inspektion och provning har haft användning inom följande områden:

1. Trycksatta anordningar har givna besiktningsintervall som är villkorade i föreskriften AFS 2005:3 Besiktning av trycksatta anordningar. Om en anläggningsägare skulle vilja förlänga besiktningsintervallet finns det möjlighet till det om anordningen i fråga uppfyller de villkor som ställs på ett längre intervall vid återkommande besiktning enligt AFS 2005:3. Det krävs då en utredning, ofta kallad "särskild utredning", för att visa att villkoren i AFS 2005:3 är uppfyllda, att det är möjligt att förlänga intervallet och vilka eventuella åtgärder som är kopplat till det. Med riskbaserade metoder kan den särskilda utredningen genomföras systematiskt och med hög precision.
2. Non-intrusive inspection (NII), innebär oförstörande provning av insidan av tryckkärl och rörledningar från utsidan, utan att provade objekt öppnas. För en sådan provning ska vara meningsfull är det viktigt att för varje berört tryckkärl bestämma i) skademekanismer som kan vara aktuella, ii) provpositioner som är kritiska och iii) provmetoder som kan hitta möjliga skador. Precis som vid konventionell provning är det också nödvändigt att bestämma vilka skadeomfattningar som är acceptabla samt bedöma vilka konsekvenser ett eventuellt haveri skulle få. Syftet med detta är att kunna bestämma lämpliga inspektionsintervall eller avgöra om föreskrivna inspektionsintervall är relevanta. I anläggningar med omfattande utrustning är systematiska och riskbaserade metoder ett bra arbetssätt för att få svar på dessa frågeställningar.
3. Riskbaserade metoder för inspektionsplanering (RBI), är för närvarande inte aktuella i syfte att kunna vara ett alternativ till nuvarande regelverk. Man måste alltså följa det arbetssätt som föreskrivs för besiktningspliktig utrustning enligt gällande föreskrift AFS 2005:3. Riskbaserade metoder kan dock användas för utrustning som inte besiktningspliktig samt som ett komplement till besiktningspliktig- an dock utföras som ett komplement. RBI har ambition att vara säkrare och billigare än konventionell besiktning men har idag liten användning

eftersom de totala kostnaderna blir höga när inspektion och provning dessutom måste utföras så som regelverket föreskriver.

Ovan beskrivna tillämpningar bygger i grunden på samma metod och arbetssätt. Detta beskrivs ingående i Värmeforskrappport 1137 "Förlängda driftperioder mellan underhållsstopp" där en metod utvecklas för att erhålla underlag för beslut om driftperioden mellan underhållsstopp kan förlängas hos sodapannor. Metod och arbetssätt beskrivs också närmare i avsnittet nedan där det ges ett exempel på en annan studie av förlängd driftintervall.

#### 1.9.13 Exempel: Särskild utredning rörande möjligheter till förlängt driftintervall hos högtrycksföroarmare

Högtrycksföroarmare har som funktion att ytterligare värma upp matarvatten innan det går in i pannan. Uppvärmningen sker med hjälp av avtappad ånga från turbinen. I aktuell anläggning finns fyra stående högtrycksföroarmare av tub-manteltyp med matarvatten i tuberna som värms upp av ånga på mantelsidan. Föroarmarna är i två led där ånga leds in de två första föroarmarna, genom dessa och vidare in till de två sista där ångan kondenserar.

Besiktningssintervallet är 4 år och anläggningsägaren har önskemål om att förlänga detta till 6 år. En särskild utredning genomförs. Till att börja med samlas det underlag som behövs för utredningen in:

- Funktion, design, design- och driftdata
- Historik – skador, modifieringar, drift
- Provnings- och besiktningshistorik

Sedan genomförs en riskanalys med följande steg:

- Bedömning av skademekanismer, individuellt för varje ingående komponent.
- Bedömning av sannolikhet av att en skada ska ske inom 9 år (enligt AFS2005 ska 1,5 x tilltänkt besiktningssintervall bedömas; vid kortare intervall än 4 år kan dock 2 x tilltänkt besiktningssintervall rekommenderas).
- Konsekvensanalys av haveri alternativt läckage på vatten och ångsida.

Det främsta motivet till att förlänga driftintervallet är att det är kostsamt att i) öppna upp för insidig undersökning samt ii) avisolera för utsidig undersökning. Luftföroarmarna har inte haft problematiska skador.

#### Arbetsgång

Insamlade data sammanställs i ett Excelark med följande kolumner:

- Utrustnings ID
- System/komponent
- Material
- Driftdata
- Miljö/kemikalie
- Drifterfarenhet
- Inspektionsresultat

Från detta kan möjliga och observerade skademekanismer bedömas. Sannolikheten för att de var och en för sig eller om möjligt i kombination kan orsaka haveri eller läckage

inom 9 år bedöms sedan för respektive komponent. Följande komponenter bedömdes för respektive högttrycksförvärmare:

- Tubsats invändigt/in
- Tubsats invändigt/ut
- Tubsats utvändigt/in
- Tubsats utvändigt/ut
- Tubplåt
- Baffelplåt
- Mantel
- Stuts vatteninlopp
- Stuts vattenutlopp
- Stuts ånginlopp
- Stuts dränager
- Gavel/vattenkammare

Eftersom olika förvärmare hade olikheter rörande drift- och miljöparametrar får de utvärderas var och en för sig. Bedömda sannolikheter delas in i olika klasser i en femgradig skala.

Villkor för förlängning till ett sex-årigt besiktningintervall är att krypning och utmattning inte får förekomma. Det är lätt att visa att krypning inte är aktuellt eftersom drifttemperaturerna är långt under krypområdet. Däremot förekommer tryck- och temperaturvariationer. Därmed krävs en utmattningsanalys för att visa om aktuella laster kan leda till utmattning eller inte.

Därefter görs en bedömning av konsekvensen i form av personskada om i) ett haveri uppstår och om ii) ett läckage uppstår. För att inte övervärdera konsekvenserna är det lämpligt att man bryter ner dessa i ett så kallat händelsetråd där även sannolikheten för en händelse beaktas. I det här fallet är det värsta tänkbara scenariot att en grupp besökare står i närheten då en högttrycksförvärmare havererar, vilket då sannolikt skulle medföra flera dödsfall. Det befinner sig dock inte alltid en grupp besökare vid högttrycksförvärmarna utan snarare enstaka timmar per år. Den sammanvägda konsekvensen för den händelsen blir alltså lägre ju mer sällan besökare finns på plats. Andra händelser kan vara att någon anställd arbetar intill högttrycksförvärmarna. Det sker mer frekvent jämfört med händelsen besöksgrupper men antalet döda/skadade skulle sannolikt bli mindre i fall av haveri då enstaka personer arbetar intill.

När samtliga möjliga händelser har utvärderats beräknas totala konsekvensklasser från händelsetråd för haveri respektive läckage av vatten och ånga.

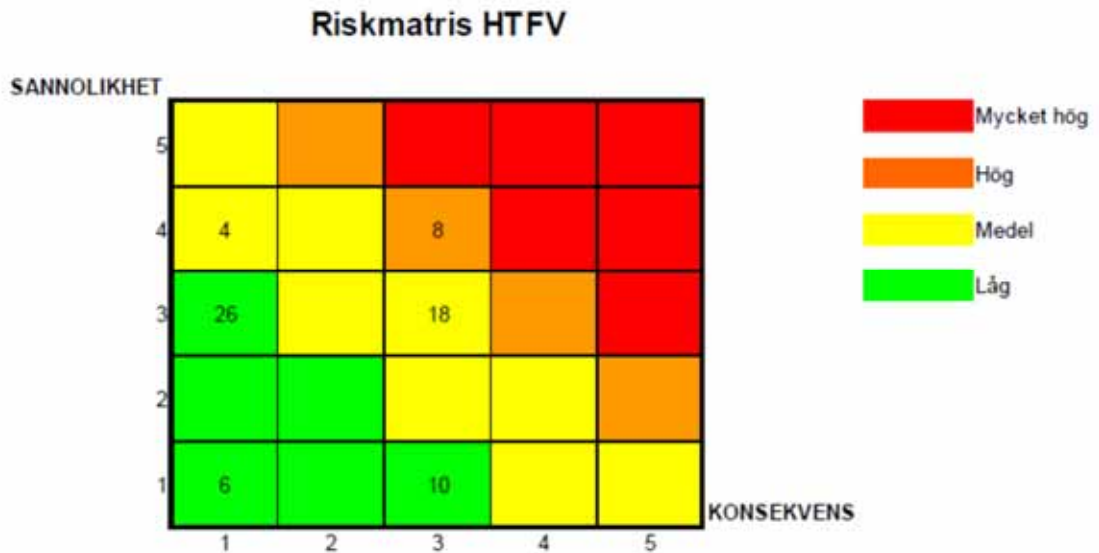
Exempel på Excelark med sammanställningar, händelsetråd och bedömningar i samband med riskanalyser kan ses i Värmeforskrapport 1137.

### Resultat

Genomgången av observerade och möjliga skademekanismer visar att det finns flera delar av förvärmarna som kan ha betydande skador men som aldrig eller inte på mycket länge har undersökts. Vissa tubsatser hade t.ex. upp till 30 % godsfortunning vid mätningar 15 år tidigare (inga mätningar sedan dess). Tubläckage kan medföra reducerad tillgänglighet men inte några allvarliga konsekvenser ur säkerhetssynpunkt. Vattnets syrehalt tidvis varit förhöjd och gropfrätning kan ha bildats även på manteln. Mantelläckage skulle innebära allvarliga konsekvenser. I förvärmarna finns områden

där låga vattenflöden eller stillastående vatten kan förväntas. Det ökar sannolikheten för gropfrätning och spänningskorrosionssprickning.

Några sprickor har påträffats vid ett tillfälle i en av förvärmarna. De slipades bort. Skademekanismen är inte klarlagd. Cykliska laster förekommer och en utmattningsanalys gjordes. Den visade att förekommande cykliska laster inte kommer att leda utmattning. Utredningen pekar dock på att spänningskorrosionssprickning i svetsar inte kan uteslutas. Figur 1.9-15 visar resultatet av riskanalysen. Åtta komponenter hamnar i ett område i riskmatrisen som innebär hög risk. Åtgärder i krävs för att nå en acceptabel risknivå för dessa komponenter. Automatiserad tjockleksmätning av manteln i kritiska områden samt UT av de mest utsatta svetsarna föreslogs. Provnings med acceptabla resultat medför att sannolikheten för läckage minskar och därmed kan komponenten klassas till en lägre risknivå som är acceptabel med avseende på förlängt driftintervall. Hittas skador måste dessa bedömas. Det kan eventuellt behövas en förfinad analys för att avgöra om det är möjligt att förlänga driftintervallet.



**Figur 1.9–15.** Resultat av riskanalys av högtrycksförvärmare. Åtta komponenter klassas som hög risk och måste åtgärdas.

**Figure 1.9–15.** Results of the risk analysis of high pressure preheaters where eight components are high risk classified and actions have to be undertaken for them.

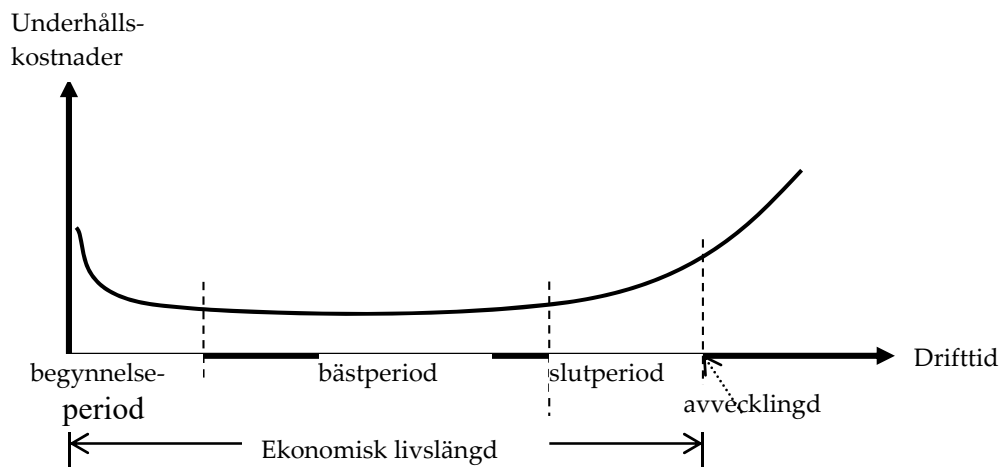
## REFERENSER

- [1] J. Lancaster, *Engineering Catastrophes – causes and effects of major accidents*, Abington Publishing, Cambridge, England, 1997.
- [2] *Reliability-Based Mechanical Design*, Ed. T.A. Cruse, Marcel Dekker Inc., New York, 1997.
- [3] M.T. Kowal, *Mechanical system reliability and cost integration using a sequential linear approximation method*, Ph.D. Dissertation, Vanderbilt University, Nashville, 1996.
- [4] O. Ditlevsen and H.O. Madsen, *Structural Reliability Methods*, John Wiley & Sons, New York, 1996.
- [5] H.O. Madsen, S. Krenk and N. Lind, *Methods of Structural Safety*, Prentice-Hall Inc., New Jersey, USA, 1986.
- [6] R.E. Melchers, *Structural Reliability, Analysis and Prediction*, Ellis Horwood Limited, England, 1987.
- [7] J.D. Sørensen, *Reliability-Based Inspection Planning for Structural Systems*, Reliability and Optimization of Structural Systems, V (B-12), 1993.
- [8] I. Enevoldsen and J.D. Sørensen, *Reliability-Based Optimization in Structural Engineering*, Structural Safety, Vol. 15, pp. 169-196, 1994.
- [9] S.G. Hellevik, *Cost Optimal Reliability Based Inspection and Maintenance Planning of Pipelines Subjected to CO<sub>2</sub> Corrosion*, Ph.D. Dissertation, Stavanger College, Norway, 1998.
- [10] M.G. Silk, A.M. Stoneham and J.A.G. Temple, *The Reliability of Non-destructive Inspection*, Adam Hilger, Bristol, England, 1987.
- [11] H.O. Madsen, *Model Updating in Reliability Theory*, Proc. Of ICASP5, pp. 564-577, Canada, 1987.
- [12] A. H.-S. Ang and W.H. Tang, *Probability Concepts in Engineering planning and Design – vol. 1: Basic Principles*, Chapt. 8, John Wiley & Sons, New York, 1975.
- [13] *ASME Risk Based Inspection – Development of Guidelines, Vol. 1, General Document*, Report CRTD Vol. 20-1, ASME, New York, 1991.
- [14] *ASME Risk Based Inspection – Development of Guidelines, Nuclear Components, Vol. 2, Report CRTD Vol. 20-2 & 20-4*, ASME, New York, 1998.
- [15] *ASME Risk Based Inspection – Development of Guidelines, Fossil Fuel Fired Electric power Generating Station Applications*, Report CRTD Vol. 20-3, ASME, New York, 1994.
- [16] *ASME Application Handbook for Risk-Based Methods for Equipment Life Management*, Report CRTD Vol. 41, ASME, New York, 1999.
- [17] *DNV Recommended Practice for Risk Based Inspection of Offshore Pressurised Equipment*, DNV RP G-101, Det Norske Veritas, 2000.

- [18] *API Base Resource Document – Risk Based Inspection*, API 581, 1<sup>st</sup> Edition Draft, 1996.
- [19] *API Recommended Practice – Risk Based Inspection of Refinery Process Plants*, API 580, Draft no. 1.1, American Petroleum Institute, 2000.
- [20] R. Ramakumar, *Engineering Reliability – Fundamentals and Applications*, Prentice-Hall, 1993.
- [21] *T-boken, Tillförlitlighetsdata för komponenter i nordiska kraftreaktorer*, SKI, version 4, ISBN 91-7186-303-6.
- [22] *IEEE Std 500-1984, Equipment Reliability Data for Nuclear-Power Generating Stations*, IEEE and John Wiley & Sons, 1984.
- [23] *OREDA, Offshore Reliability Data Handbook*, 3rd ed., ISBN 82-14-00438-1, SINTEF/ Det Norske Veritas, Norway, 1997.
- [24] *An Engineer's View Of Human Error*, Trevor A. Kletz, The Institute of Chemical Engineers, Warwickshire, England, 1985.
- [25] I.S. Sutton, *Process Safety Management*, Southwestern Books, 2nd Ed, 1997.
- [26] R. Ramakumar, *Engineering Reliability: Fundamentals and Applications*, Prentice-Hall, 1993.
- [27] *PSA Procedures Guide*, NUREG/CR-2815.
- [28] Gruhn and Cheddie, *Safety Shutdown Systems: Design, Analysis and Justification*, ISA, 1998.
- [29] *Application of Safety Instrumented Systems for the Process Industries*, International Society for Measurement and Control, ANSI/ISA S84.01, 1996.
- [30] W.M. Goble, *Evaluating Control System Reliability*, International Society for Measurement and Control, 1992.
- [31] J.R. Taylor, *Risk Analysis for Process Plants, Pipelines and Transport*, E&FN Spon, 1994.
- [32] Ansell and Wharton, *Risk Analysis, Assessment and Management*, John Wiley&Sons, 1992.

### 1.10 EKONOMI-EKONOMISK LIVSLÄNGD

Fel uppstår på en utrustning förr eller senare. Det är ofta fler fel i början av en utrustnings livslängd på grund av tillverkningsfel samt i slutet av livslängden på grund av slitage. När eventuella fel i en inkörningsperiod eliminerats, kommer en tidsperiod där eventuella fel inträffar slumpmässigt. Sådana fel antas att ha konstant intensitet och uppvisar inte orsak av ålderssymptom på utrustningen. I allmänhet klassificeras en utrustnings livslängd i tre tidsperioder: begynnelseperiod, bästperiod och slutperiod. I begynnelseperioden räknar man med höga underhållskostnader. Efter begynnelseperiod sjunker underhållskostnaderna och ligger kvar på en låg nivå tills utrustningen börjar bli så gammal och sliten att underhållskostnaderna stiger igen. Under bästperioden av utrustningens livslängd inträffar eventuella fel slumpmässigt som ger jämna underhållskostnader. Vi får en badkarskurva som beskriver underhållskostnaderna under utrustningens livslängd, se Figur 1.10-1.



**Figur 1.10-1** Badkarskurvan som visar underhållskostnader under en utrustnings livslängd. Ekonomisk livslängd är tiden fram till den avvecklingstidpunkt som för ett investeringsalternativ ger optimal lönsamhet.

**Figure 1.10-1** Bathtub curve which shows the maintenance costs during the life time of an equipment. Economical life time is the time upto the replacement time which gives the optimal profit from an alternative investment.

Den avvecklingstidpunkt som visas i figuren är ett mått på ekonomisk livslängd. Ekonomisk livslängd är ett teoretiskt begrepp och avser tiden fram till den avvecklingstidpunkt som för ett investeringsalternativ ger optimal lönsamhet. Underhållskostnader samt andra kostnader av betydelse (driftskostnader och kapitalkostnader) kan användas som beslutsriterium för en livslängdsbedömning och som ett beslutsverktyg för att välja mellan olika alternativ när lönsamhet och tid är övergripande beslutsriterium vid bedömningen.

Livslängd är ett tidsbegrepp som kan vara objektsrelaterande såsom teknisk livslängd eller helt teoretisk såsom ekonomisk livslängd. Ekonomisk livslängd kan definieras som den tidsperiod under vilken drift av systemet i fråga är ekonomiskt gynnsammare än det till buds stående mest fördelaktiga alternativet. Den ekonomiska analysen baseras på faktisk kunskap om till exempel ett systems verkliga tekniska och fysiska



tillstånd och riktiga antaganden om framtida kostnader för användning av systemet för de olika alternativen. Alla system har en begränsad ekonomiskt livslängd, d.v.s. det är endast lönsamt att äga eller använda systemet under en ansatt tid baserad på aktuell planeringshorisont. Lönsamhet är dock ett relativt begrepp som beror på syftet med utnyttjandet av systemet. Med förändrat syfte kan systemet fortsätta att vara lönsamt.

Ett exempel för ovannämnda livslängder kan vara en pump som förväntas ha en teknisk livslängd på tio år. Om ändringar i produktionskapacitet eller i tekniska specifikationer kräver byte av pumpen till en annan pump efter några år i drift, blir denna tid pumpens tekniska livslängd. I båda fallen kan det hända att drift- och underhållskostnader stiger i sådana takt att utbyte av den gamla pumpen är lönsammare före den tekniska livslängden.

#### 1.10.1 Ekonomiska strategier

Ekonomisk strategi är val mellan olika alternativ med olika beslutskriterier idag och i morgon. Denna ska baseras på svagheter och styrkor, hot och möjligheter, samt förändringar i mikro- och makroomgivning av ett systems funktion. Några exempel på ekonomiska strategier för ägande eller utnyttjande av ett system skulle kunna vara:

- Hög tillgänglighet genom utbyte till ett nytt system eller total renovering.
- Förlängning av livslängd genom smärre åtgärder eller att ha systemet i drift så länge som möjligt utan större investeringar.
- Anskaffa system där drift och underhåll sköts av leverantör/tillverkare.
- Anskaffa bättre utrustning med bättre design och prestanda som ger mindre drift- och underhållskostnader.
- Outsourcing av drift och underhåll med vissa krav på systemets funktion och tillgänglighet.

Faktorer som påverkar ekonomiska strategier kan vara:

- Parametrar som skall ingå i en livslängdsanalys t.ex. anskaffningsår, anskaffningsvärde, användningssätt (produktion, lager), avskrivningar (planmässiga, kalkylmässiga och skattemässiga), kalkylmässig ränta, försäkringsvärde, skattesystem.
- Säkerhetskrav, miljökrav företagspolicy och direktiv.
- Teknisk utveckling

#### 1.10.2 Ekonomisk livslängd som bas för underhållsarbete

En allmänt accepterad definition på underhåll är alla åtgärder som utförs i syfte att vidmakthålla en utrustning, eller att återställa den, i sådant skick att planerad verksamhet kan genomföras störningsfritt. Underhållsarbete innebär alla typer av aktiviteter inklusive administrativt arbete som utförs för att bibehålla i eller återställa en utrustnings till ett tillstånd, där den kan utföra angiven prestation. Den största motiveringen för ett planerat underhållsarbete är att reparationskostnader eller haveririsk blir för höga vid ett oplanerat underhållsarbete. Underhållsarbete kan vanligtvis förknippas med följande egenskaper:

- Säkerhetsbefrämjande d.v.s. minskning av risk för skador på person, egendom och miljö.
- Resursutnyttjande och produktionsbefrämjande d.v.s. ökad realkapital-utnyttjning och stigande produktionsvolym.

- Livslängdsökande
- Tillgänglighet, tillförlitlighet och kvalitetsbefrämjande

Ovannämnda egenskaper tillfredsställs antingen genom utbyte till en ny komponent eller med en reparation av den gamla. Den ekonomiska betydelsen avgör om utrustningen skall repareras eller bytas ut med en ny, samt planering av reparation eller utbyte i framtiden. Denna ekonomiska betydelse beskrivs väl med ekonomisk livslängd för en utrustning. Olika optimeringskriterier kan användas för att hitta en ekonomisk livslängd som kan användas som bas för underhållsarbetet. De mest vanliga optimeringskriterierna är att:

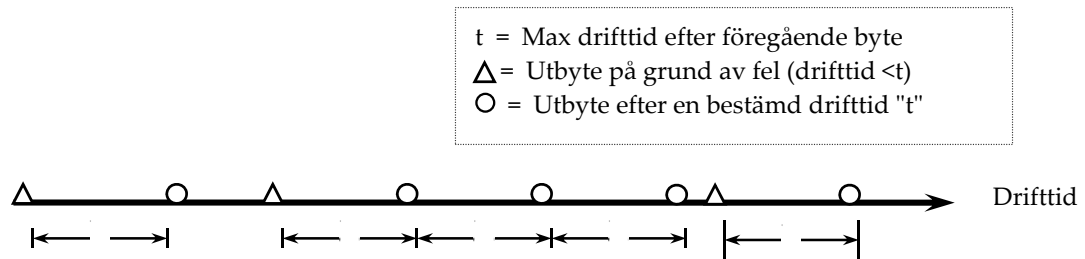
- Minimera totalkostnad (kostnader för drift och underhåll)
- Maximera vinst
- Maximera produktion
- Maximera tillgänglighet

Modeller som används för att hitta en ekonomisk livslängd på en utrustning kan klassificeras som stokastiska och bestämbara. Stokastiska modeller är baserade på minimering av kostnad som optimeringskriterium om reparationskostnaden eller utbyteskostnaden efter ett fel inte varierar med åren. Parametrar som marknadsränta och inflation ingår inte i modellen. De flesta stokastiska modeller använder dessa kriterier (se i detalj i avsnitt 1.10.2.1). Några av de bestämbara modellerna använder också dessa kriterier (se i detalj i avsnitt 1.10.2.2). För kapitalintensiv utrustning används maximering av vinst, produktion eller tillgänglighet som livslängdsmodell (se i detalj i avsnitt 1.10.2.3).

#### *1.10.2.1 Ekonomisk livslängdsmodell under stokastiska förutsättningar*

Med stokastiska förutsättningar menas att tiden som fordras för och utfallet av ett byte av en utrustning är slumpartade. Tiden mellan fel är en stokastisk variabel och dess fördelning kallas livslängdsfördelning för denna utrustning.

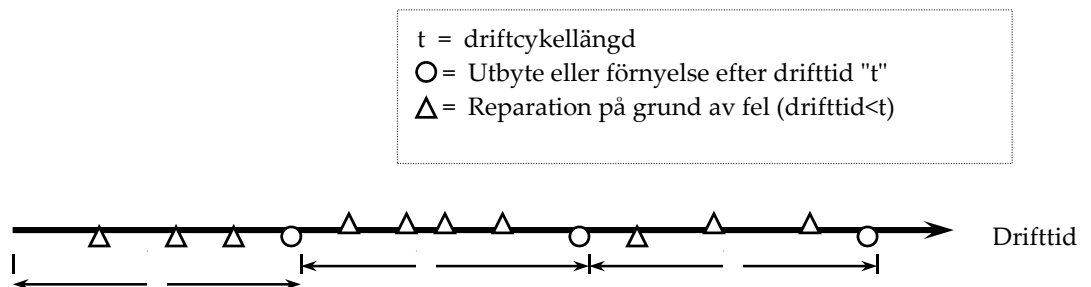
Underhåll utförs normalt på två olika typer av enheter: reparerbara och icke-reparerbara. Reparerbara enheter repareras generellt när ett fel inträffar och icke-reparerbara enheter kasseras då den går sönder och ersätts med en ny enhet. Reparerbara enheter ersätts också med nya när reparationskostnaderna i framtiden kommer att överstiga anskaffningskostnader. System är oftast reparerbara medan komponenter är ofta icke-reparerbara. Modellerna för att beskriva ekonomisk livslängd för dessa både typer av enheter är i allmänhet olika. Icke-reparerbara enheter byts ut antingen när ett fel inträffar eller då enheten har uppnått en viss ålder. Sådana underhållsstrategier kallas *åldersbaserat* eller *drifttidsstyrt underhåll* (Figur 1.10-2).



**Figur 1.10-2** En illustration av åldersbaserad underhållspolicy. Enheten byts då den går sönder och då den varit i drift under tiden " $t$ ".

**Figure 1.10-2** An illustration of age based maintenance policy. A unit is replaced when it fails and when it has been in operation for " $t$ " units of time.

För reparerbara enheter, återställs funktionen när ett haveri inträffar i allmänhet. Enheten repareras då den går sönder och den byts om denna har varit i drift under tiden " $t$ " efter föregående. När enheten har uppnått en viss ålder eller sin tekniska livslängd, ersätts den med en ny eller förnyas. Sådana underhålls strategier kallas blockbaserat underhåll med minimal reparation eller kalenderstyrt underhåll (Figur 1.10-3). Om enheten efter ett fel återställs i ett läge som kan betraktas som en ny enhet, bestäms den ekonomiska livslängden med hjälp av modeller för åldersbaserat underhåll.



**Figur 1.10-3** En illustration av blockbaserat underhållspolicy. En enhet repareras då den går sönder och den byts om denna har varit i drift under tiden  $t$  efter föregående.

**Figure 1.10-3** An illustration of block based maintenance policy. A unit is repaired when it fails and is replaced if it has been " $t$ " units of time in operation after the previous replacement.

I detta sammanhang är ekonomisk livslängd tiden mellan utbyte eller förnyelse av en enhet d.v.s. optimalt värde av " $t$ " som ger de lägsta underhållskostnaderna. Statistiska eller analytiska modeller kan användas för bedömningen av ekonomisk livslängd. Sådana modeller är baserade på följande antaganden:

- Kostnad för reparation eller utbyteskostnad efter ett fel varierar inte med åren. Ingen påverkan av marknadsränta och inflation.
- Data på felstatistik är tillgänglig eller livslängdsfördelningar är kända.
- Utbytestid är försumbar.

Grundprincipen för modeller som tillämpas på åldersbaserad underhållspolicy är att minimera genomsnittskostnaderna per tidsenhet. Tiden mellan två successiva utbyten

(oberoende av orsak) är en cykel. Den genomsnittliga kostnaden per tidsenhet i det långa loppet blir

$$= \frac{\text{summan av förväntade kostnader för ett byte av ålderskäl och på grund av fel}}{\text{förväntad genomsnittlig cykellängd}}$$

Antingen statistiska eller analytiska modeller kan användas för att hitta ett optimalt värde för "t" som ger minsta underhållskostnaden per tidsenhet i det långa loppet. Detta värde på "t" blir ekonomisk livslängd för denna enhet. Om data på tider till fel är tillgängliga kan en tillförlitlighetsmetod som kallas Total Time On Test-Plot (TTT-plot) användas för att beräkna optimalt värde på "t". Om livslängdsfördelningen är känd, kan man använda en Weibull-fördelningsmodell för att beräkna den ekonomiska livslängden. För matematiska formuleringar av sådana modeller, se (Blanks1992) och (Bergman 1996). Om en komponents livslängd påverkas av sin operativa omgivning, till exempel tryck, damm, temperatur, skall man använda modeller som tar hänsyn till den operativa omgivningen, se (Kumar 1997).

Grundprinciper för modeller som tillämpas för blockbaserat underhållspolicy är att minimera genomsnittskostnaderna per tidsenhet. Tiden mellan två successiva utbyten eller förnyelser är en cykel med längden "t" tidsenhet. Genomsnittliga kostnaden per tidsenhet i det långa loppet blir

$$= \frac{\text{kostnaden för ett byte/förnyelse + förväntade reparationskostnaden i en cykel}}{\text{genomsnittliga cykellängden}}$$

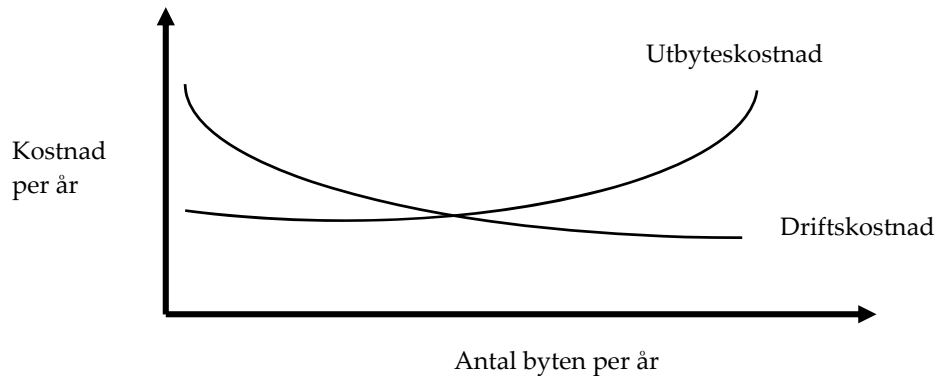
Även här kan antingen statistiska eller analytiska modeller användas för att hitta ett optimalt värde för "t" som ger minsta underhållskostnaden per tidsenhet i det långa loppet. Detta värde på "t" blir ekonomisk livslängd för denna enhet. Om data för tid till fel finns tillgängliga kan en tillförlitlighets metod som kallas hazard-plottning eller "Power Law Process" användas för att beräkna optimalt värde på "t". För matematiska formuleringar av sådana modeller se (Blanks 1992) och (Bergman 1996).

De ovannämnda metoderna skall användas för enheter som har kortare livslängd så att antagandet om samma reparations- eller utbyteskostnader stämmer med verkligheten.

#### 1.10.2.2 Ekonomisk livslängd under bestämbara förutsättningar

Med bestämbara förutsättningar menas att tiden som fordras för och utfallet av byte är kända. Om vi t.ex. har en utrustning som har ökande driftkostnader, men inte går sönder vid användning, så minskas driftkostnaderna om vi byter ut utrustningen. Efter bytet är driftkostnadsutvecklingen känd.

Driftkostnad för en utrustning kan stiga genom förslitning av några komponenter. Några av dessa komponenter kan bytas ut eller repareras och därmed reduceras driftkostnaderna för utrustningen. Byten eller reparationer blir en kostnad som skall balanseras mot minskning i driftkostnaderna, se Figur 1.10-4. Följaktligen vill vi bestämma en ekonomisk livslängd på sådana utbytbara eller reparerbara komponenter med vilken vi kan minimera summan av drift och utbyteskostnaderna.

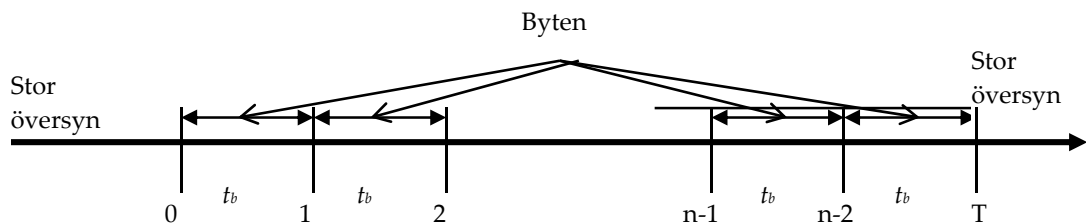


**Figur 1.10-4** En illustration av beslutproblem när driftskostnaden minskas med antal byten per år.

**Figure 1.10-4** An illustration of the decision problem when the operation cost decreases with the increase in total number of replacements or renewals.

Ekonomiska livslängdsmodeller för ett sådant problem har följande antaganden:

- Utbyteskostnaden måste vara högre efter det att utrustningen har gått sönder än innan. Ibland kan dock till exempel hindertiden vara ett bättre kriterium än kostnaden.
- Utrustningens felintensitet måste öka med tiden.
- Driftskostnaden ökar med tiden.
- Byten eller reparationer medför att utrustningen återförs till samma tillstånd som den befann sig i när den var ny dvs kostnader och felfördelningar är alltid samma.
- Byten eller reparationer sker dock vid samma tidsintervall, se Figur 1.10-5.



**Figur 1.10-5** En illustration av underhållsarbete där  $n$  byten utförs med lika intervall,  $t_b$ , mellan två tidpunkter  $(0, T)$  för översyn.

**Figure 1.10-5** An illustration of maintenance work when  $n$  replacements occur at equal time interval of " $t_b$ " units of time between two major overhauls under the time  $(0, T)$ .

En ekonomisk livslängdsmodell för sådant underhållsarbete beror på två typer av beslutskriterium:

- Minimering av totalkostnaden mellan två stora översyner  $(0, T)$
- Minimering av totalkostnaden per tidsenhet istället för mellan två stora översyner  $(0, T)$

För båda beslutskriterierna målsättningar gäller en matematisk formulering av totalkostnaden som är summan av utbyteskostnaden och driftkostnaden. En

optimerings metod används för att hitta en optimal ekonomisk livslängd, d.v.s. optimalt värde på utbytesintervall.

Låt parametrar som skall ingå i modellen betecknas enligt följande:

$k(t)$  = driftkostnader per tidsenhet vid tidpunkten  $t$  efter utbyte eller reparation,

$K_b$  = utbytes- eller reparationskostnader,

$t_b$  = drifttid mellan utbytena,

$t_r$  = utbytestid (i praktiken kan man dock ofta försumma utbytestiden under

förutsättning att den är liten i jämförelse med intervallen mellan bytena),

$T$  = drifttid mellan två översyner,

$n$  = antal byten mellan två översyner.

Totalkostnaden mellan två stora översyner ( $0, T$ ) är

$K(t_b) = n \text{ gånger utbyteskostnaden} + (n+1) \text{ gånger driftkostnaden}$

$$K(t_b) = n \times K_b + (n+1) \int_0^{t_b} k(t) dt \quad (1.10-1)$$

men eftersom  $n$  är funktion av  $t_b$

$$(n+1)t_b = T \Leftrightarrow n = \frac{T}{t_b} - 1 \quad (1.10-2)$$

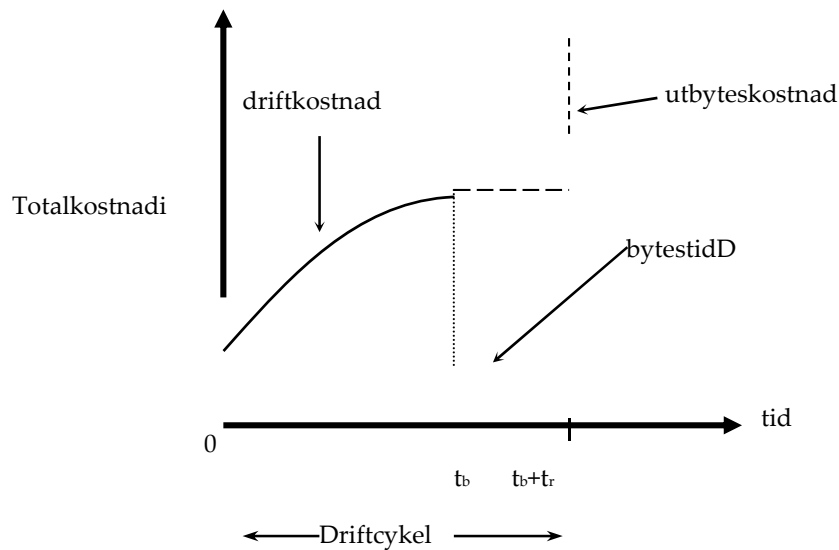
Genom insättning av relation (1.10-2) i ekvation (1.10-1) blir

$$K(t_b) = \frac{TK_b}{t_b} - K_b + \frac{T}{t_b} \int_0^{t_b} k(t) dt \quad (1.10-3)$$

Om reparationstiden inte är försumbar, har ekvationen (1.10-3) följande form

$$K(t_b) = \frac{TK_b}{t_b + t_r} - K_b + \frac{T}{t_b + t_r} \int_0^{t_b} k(t) dt \quad (1.10-4)$$

Det första termen i ekvation 1.10-4 är totalkostnaden för ett antal byten plus ett under tiden ( $0, T$ ). Den andra termen är kostnad för ett byte. De första två termerna är utbyteskostnad under tiden ( $0, T$ ). Den tredje termen är de sammanlagda driftkostnaderna som ökar under tiden ( $0, t_b$ ) efter varje byte. Termer på högra sidan i ekvationen ger totalkostnad under en driftperiod av  $T$  tidsenheter. Ekonomisk livslängd är den värde på  $t_b$  som ger den lägsta totala kostnaden,  $K(t_b)$ . Åtskilliga numeriska eller grafiska metoder kan användas för att hitta ett optimalt  $t_b$ , se (Jardine 1973); (Johansson 1993) för detaljer. Om minimering av totalkostnad per tidsenhet är beslutskriterium, utvecklas modellen med hjälp av utbytes- och driftkostnad per tidsenhet för varje driftcykel. Varje driftcykel består av en driftkostnad under tiden ( $0, t_b$ ) och en utbyteskostnad som sker vid tidpunkten  $t_b$ , se Figur 1.10-6.



**Figur 1.10-6** En illustration av totalkostnaden under en driftcykel. Driftkostnaden ökar med tiden och utbyteskostnaden kan betraktas som engångskostnad i varje driftcykel.

**Figure 1.10-6** An illustration of total cost in an operation cycle. The operating cost increases with time and the replacement cost can be considered as a fixed cost in every operating cycle.

$$\begin{aligned} \text{Totalkostnaden per tidsenhet} &= \frac{\text{Totalkostnad i en driftcykeltid}}{\text{driftcykeltid}} \\ &= \frac{\text{summa av driftkostnaden under tiden } (0, t_b) + \text{utbyteskostnad}}{\text{driftcykellängd } (= t_b + t_r)} \end{aligned}$$

Dessa samband kan uttryckas matematiskt med

$$K(t_b) = \frac{1}{t_b + t_r} \left[ K_b + \int_0^{t_b} k(t) dt \right] \quad (1.10-5)$$

Om reparationstiden är försumbar, får ekvationen följande form

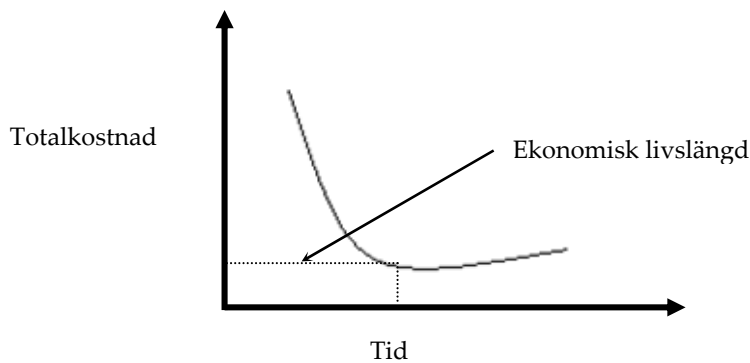
$$K(t_b) = \frac{1}{t_b} \left[ K_b + \int_0^{t_b} k(t) dt \right] \quad (1.10-6)$$

Ekonomisk livslängd är den värde på  $t_b$  som ger den lägsta totalkostnaden,  $K(t_b)$ .



### Kommentarer

Om det är svårt att få tag i värden på de parametrar som fordras i ovannämnda modeller, kan man använda en grafisk analys genom att rita totalkostnaden på y-axeln och tiden på x-axeln såsom visas i Figur 1.10-7

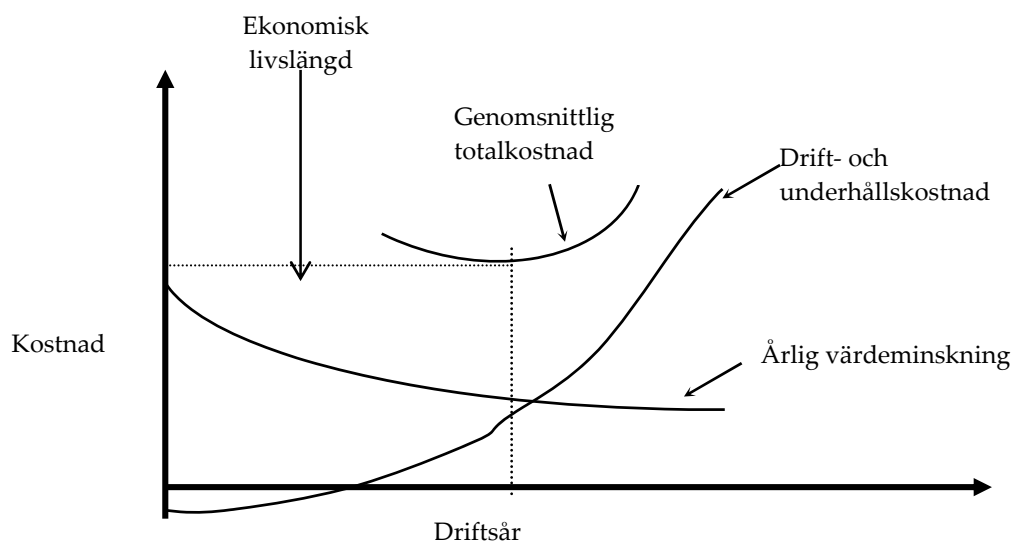


**Figur 1.10-7** En grafisk metod för att bedöma ekonomisk livslängd som är lika med den tidpunkt där totalkostnaden är minst.

**Figure 1.10-7** A graphical method for an estimation of the economical life time which is equal to the time point where the total cost is the minimum.

Den ekonomiska livslängden är den tidpunkt som ger minsta totalkostnaden. Fördelen med denna metod i jämförelse med föregående metoder är att det är lättare att göra känslighetsanalys genom variation på okända parametrar och notera vilken effekt de har på den ekonomiska livslängden. Det är inte viktigt att planera utbytesåtgärd om kurvan är tämligen horisontell runt omkring optimum.

#### 1.10.2.3 Ekonomisk livslängdsmodell för kapitalintensiv utrustning



**Figur 1.10-8** En illustration av ekonomisk livslängdsbedömning för en kapitalintensiv utrustning. Ekonomisk livslängd är lika med det tidsintervall som ger minsta genomsnittlig totalkostnad.

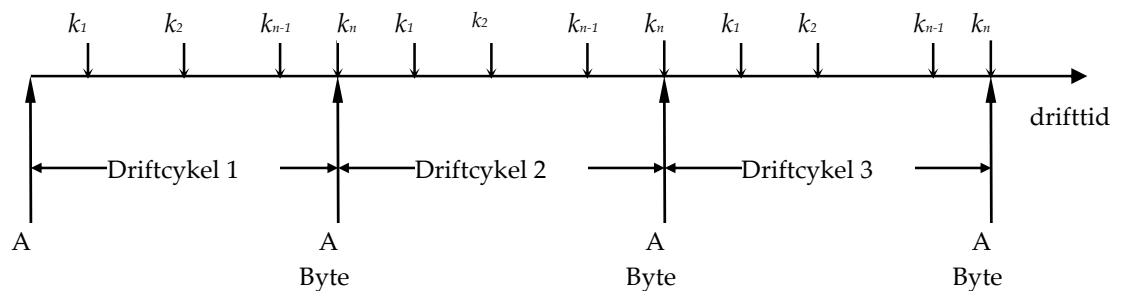
**Figure 1.10-8** An illustration of the determination of the economical life time of a capital intensive equipment. Economical life time is the time interval which gives the minimum average total cost.

För att jämföra olika kostnader och intäkter under många år, används diskonterings- och kapitaliseringsteknik. Det värde ett visst belopp har, beror på när det inträffar. Tekniken för att beräkna detta värde och därmed också göra kostnader och intäkter vid olika tidpunkter jämförbara heter antingen diskontering eller kapitalisering. Om referenstidpunkten ligger tidigare än då kostnader och intäkter sker, kallas den "diskontering". Om referenstidpunkten ligger senare än då kostnader och intäkter sker, kallas den "kapitalisering". Mer om terminologi som används i ekonomiska kalkyler kan läsas i ref. (Bergknut 1993). Drift- och underhållskostnader för och intäkter från en utrustning kan ske kontinuerligt eller diskret. Om livslängdmodeller kan man läsa i böcker som ref. (Jardine 1973) och (Blanks 1992). Endast modeller för diskreta kostnader och intäkter behandlas i detta avsnitt.

Låt parametrar som ingår i modellen betecknas enligt följande:

- Effektiv ränta per år som tar hänsyn till inflation per år och nominell ränta per år,  $r$ . Om prisnivån för in- och utbetalningar utvecklas parallellt är det mindre viktigt att ta hänsyn till effektiv ränta i modellen för ekonomisk livslängd. Inflation kan påverka livslängden om utbetalningar är monetärt fixerade eller inbetalningar kan fås att följa prisutvecklingen.
- Kostnad för renovering eller anskaffning av en ny utrustning,  $A$ .
- Drift- och underhållskostnader för driftperiod  $i$  för en nyrenoverad eller ny utrustning,  $k_i$ . Kostnaden betalas i slutet av period  $i$ .
- Antal driftsperioder före renovering eller ersättning med en ny utrustning,  $n$ .
- Restvärde på utrustningen efter driftperiod  $i$ ,  $R_i$ .
- Total kostnad för utrustningen som ersätts eller renoveras efter en lång framtid,  $C(n)$ .

Efter ersättning eller renovering antas att utrustningen är identisk med den föregående utrustningen då den var ny. Betalningsförlopp för en typisk utrustning illustreras grafisk i Figur 1.10-9.



**Figur 1.10-9** En illustration av diskreta kostnader som sker under en driftcykel. Varje driftcykel består av en utbyteskostnad  $A$  och  $n$  drift- och underhållskostnader som är lika med  $k_i$ .

**Figure 1.10-9** An illustration of discrete costs which occur in an operation cycle. Each operation cycle consists of replacement cost  $A$  and  $n$  operation and maintenance costs which are equal to  $k_i$ .

Det antas att utbetalningar sker i slutet av varje år och slutet av år 0 är nutidpunkt, som referenstidpunkt. Om alla kostnader som utfaller vid olika tidpunkter transporteras till referenstidpunkten kallas den nuvärde av totalkostnaden.

Nuvärde av totalkostnaden = nuvärde av summan över kostnaderna i driftcykel 1

- + nuvärde av summan över kostnaderna i driftcykel 2
- + -----
- + nuvärde av summan över kostnaderna i driftcykel (n-1)
- + nuvärde av summan över kostnaderna i driftcykel n
- + nuvärde av restvärde

Vi får följande formel för nuvärde av totalkostnaden,  $C(n)$

$$C(n) = \frac{\sum_{i=0}^n c_i r^i + r^n (A - R_n)}{1 - r^n} \quad (1.10-7)$$

Den totalkostnaden i ekvation 1.10-7 är summan av drift- och underhållskostnader för varje driftperiod plus renoverings eller anskaffningskostnad med hänsyn till effektiv ränta och avdrag för restvärde. Åtskilliga numeriska eller grafiska metoder kan användas för att hitta det optimala antalet tidsperioder före en renovering eller anskaffning av en nyutrustning, detaljer ges i (Jardine 1973). Modellen enligt ekvation (1.10-7) har olika form för olika förutsättningar t.ex. förändringar i intäkter i framtiden, förändringar i drift- och underhållskostnader, förändringar i produktionskapacitet med en ny utrustning eller en identisk utrustning samt ökning av åtgärds kostnader i framtiden. Mer kan läsas om modeller under sådana förutsättningar i (Jardine 1973) och (Blanks 1992).

### 1.10.3 Kostnader för oplanerade stopp och haverier

Kostnader för oplanerade stopp och haverier för en komponent eller en utrustning kan klassificeras i två grupper:

- Direkta kostnader
- Indirekta kostnader

Direkta kostnader är de kostnader som är mer synliga, t.ex. kostnader för material och arbete. Arbetskostnader innehåller lönekostnader och lönebikostnader d.v.s. arbetsgivaravgifter samt övriga kostnader (t.ex. administrativa) som uppstår p.g.a. att man har underhållspersonal. Materialkostnader består av kostnader för reservdelar och förbrukningsmaterial. Direkta kostnader kan vara begränsade till den komponent som har orsakat fel eller haveri. Direkta kostnader beror på underhållsstrategier, lagervolym, leverantörs framtida lagerhållning etc.

Indirekta kostnader är osäkra och beror på konsekvenserna och stillastående tid p.g.a. ett stopp eller haveri. Produktionsbortfall p. g. a. ett haveri är i generellt den största delen av indirekta kostnader i ett kraftvärmeverk. Kostnader för produktionsbortfall är inte lätta att identifiera för att de är mycket anläggningsspecifika och kan vara beroende av t.ex. antal anläggningar, tillgänglighetskrav, verkningsgrad, bränsletyp, fasta och rörliga kostnader, prioriteringsordning, pris och ränta. Indirekta kostnader är i allmänt högre än direkta kostnader. Några exempel på indirekta kostnader är:

- Kostnader för produktionsförlust (intäktsförlust).
- Kostnader för onödiga reservdelar i lager.

- Kostnader för extra underhållspersonal.
- Kostnader för sysslös driftpersonal.
- Kostnader för förlust av goodwill och minskad leveranssäkerhet.
- Kostnader för att återställa miljöskada.
- Kostnader för att åtgärda påföljd av skador på andra komponenter.
- Kostnader för försäkringspremier.

Indirekta kostnader är relaterade till alla kostnader på systemnivå inklusive inre och yttre miljö. Dessa kostnader varierar mycket beroende på alternativ produktionskälla, årsperioder, markandspriser. De är mycket företags- och kraftverksspecifika. En allmän modell för kostnader för stopp och haveri i ett kraft- och kraftvärmeverk kan vara:

Kostnader för stopp och haveri = Direkta kostnader (material + arbete) +  
Indirekta kostnader (produktionsförlust +extra  
lagervolym+ extra personal + förlust av goodwill +  
leveranssäkerhet + skador på andra komponenter  
och miljö + försäkringspremier)

#### 1.10.4 Kostnader för övervakning och provning

Kostnader för övervakning beror på komplexitet och typer (t.ex. kontinuerliga eller periodiska) av ett övervakningssystem samt leverantör av systemet eller tjänsten.

Kostnader för övervakning kan normalt klassificeras i två allmänna grupper:

- **Anskaffningskostnader:** Största delen av övervakningskostnaderna går till anskaffning av mätinstrument och programvara. I dessa kostnader ingår kostnader för:
  - × Konsult och specialisttjänster för utredning av behov av typ av instrument och programvara.
  - × Mätinstrument och programvara.
  - × Initial utbildning och träning av personal.
  - × Integrering av befintliga databaser eller samordning av länkar mellan befintliga databaser och den nya databasen.
  - × Kostnader för reservdelar/utbyte av systemet.
  - × Kostnader för lokal.
  - × Kostnader för inköp av externa tjänster.
  - × Konsulter, specialister, utbildning för användning av övervakning instrument.
  - ×
- **Driftkostnader:** Driftkostnader är de kostnader som är nödvändiga för att behålla systemet i drift, t.ex. underhållskostnader och utnyttjandet av systemet. Några av sådana kostnadselement är:
  - × Lönekostnader och lönebikostnader d.v.s. arbetsgivaravgifter samt övriga kostnader (t.ex. administrativa) som uppstår p.g.a. att man har övervaknings- och provningsverksamhet.
  - × Kontinuerlig utbildning för användning av systemet.
  - × Kostnader för reservdelar/byte av systemet.
  - × Kostnader för lokal.
  - × Kostnader för inköp av externa tjänster.

En kortfattad redogörelse över olika typer av övervakningssystem kan läsas i (Andersson 1997). Kostnader för olika övervakningssystem är i allmänhet kundspecifika och kan förenklat antas tillhöra någon av följande kategorier:

1. Program för att genomföra övervakning av en komponent eller anläggning i drift och fortlöpande ackumulera/uppdatera statusen för komponenten eller anläggningen i termer av utnyttjad och återstående livslängd etc. Exempel för sådana program är Creep-FatiguePro (utvecklat av EPRI, USA), PIPEMON-systemet och ESR-systemet (utvecklade av MPA Stuttgart, Tyskland), LENA-systemet (utvecklat av Bayernwerk AG, Tyskland), RLD-BOILER-systemet (utvecklat av KEMA, Nederländerna), ERA-PLUS-systemet (utvecklat av ERA Technology, UK), LARA-systemet, KARA-systemet och DESA-systemet (utvecklade av IfW Darmstadt, Tyskland) samt ERNA-systemet (utvecklat av B.L Kraftwerkstechnik, Oberhausen, Tyskland).
2. Program för att utifrån materialdata för ett givet material göra en värdering av säkerheten hos en komponent. Exempel för sådana program är ALIAS-systemet (utvecklat av MPA Stuttgart, Tyskland), SP-249-systemet (utvecklat genom ett EU-SPRINT projekt), HIDA-KBS (utvecklat genom EU/Brite Euram projekt), TINCA- och TINCA-PLUS-systemen (utvecklade inom ett samarbetsprojekt mellan central- och Östeuropeiska länder), R5-systemet (utvecklat av Nuclear Electric, UK).

Kostnader för oförstörande och förstörande provning beror på provningens omfattning samt leverantör av tjänsten. I allmänhet ingår följande faktorer i kostnader för provning:

1. Tidsåtgång: Tidsåtgången för ett prov är den största faktorn för provningskostnaderna. Tidsåtgången kan t.ex. bero på antal kvadratmeter provad yta, antalet sprickor eller defekter som ska storleksbestämmas, vilken mekanism som orsakar initiering och tillväxt av spricka. En okulär besiktning av t.ex. en ångdom kan ta ca 4-8 timmar. Magnet pulver provning inklusive utvärdering kan ta ca halvtimma per kvadratmeter provad yta. Ca fem repliker kan göras per timma (på ett ställe) och utvärderingen av fem repliker kan ta ca 1-5 timmar beroende på skadornas omfattning. En skadetålighetsanalys kan variera mellan 20 till 50 timmar beroende på skademekanism och komponentgeometri.
2. Timkostnad för personal: Timkostnad för personal kan variera beroende på kompetensnivå som krävs för provning, utvärderingar och analyser. Timkostnad för personal kan vara mellan ca 500-1200 kr per timma.
3. Timkostnad för utrustning: Utrustningar som används för provning kan ha mycket varierande kostnader beroende på precisionsnivåer i utrustningen.
4. Rapportering: Rapportering kan t.ex. omfatta skadebeskrivning vid metallografiska undersökningar eller presentation av en analys vid beräkningar. Slutsatser ska dras. För en genomgående undersökning av t.ex. en ångdom kan det ta ca 30 timmar och timkostnaden kan vara ca 1000 kr.
5. Övriga kostnader: Övriga kostnader består av kostnader för speciell utrustning eller material som används för provning. Övriga kostnader kan variera mellan ca 100 kr till 10 000 kr per tillfälle.

En allmän modell för kostnader för oförstörande provning kan formuleras som:

Kostnader för provning = Uppskattad tidsåtgång x Timkostnad för personal och utrustning + Kostnader för rapportering + Övriga kostnader

Som exempel kan kostnader för utvändigt magnetpulverprovning av rundsvetsar på en ångdom inklusive utvärdering och dokumentering vara:

|                               |   |                                            |
|-------------------------------|---|--------------------------------------------|
|                               | = | 4x0,5x(500+200) + 4x100 + 2 000 = 3 800 kr |
| där,                          |   |                                            |
| Yta för provning              | = | 4 kvadratmeter (12 meter svetslängd)       |
| Tidsåtgång                    | = | ½ timme per kvadratmeter                   |
| Personalkostnad               | = | 500 kr per timme                           |
| Utrustningskostnad            | = | 200 kr per timme                           |
| Övriga kostnader              | = | 100 kr per kvadratmeter                    |
| Utvärdering och dokumentering | = | 2 000kr                                    |

En konditionsanalys kan till exempel visa på att svetsarnas slagseghet måste verifieras med slagprovning för att kunna tillåta fortsatt drift. Förstörande provning innebär även kostnader för materialuttag, provstavstillverkning och reparation.

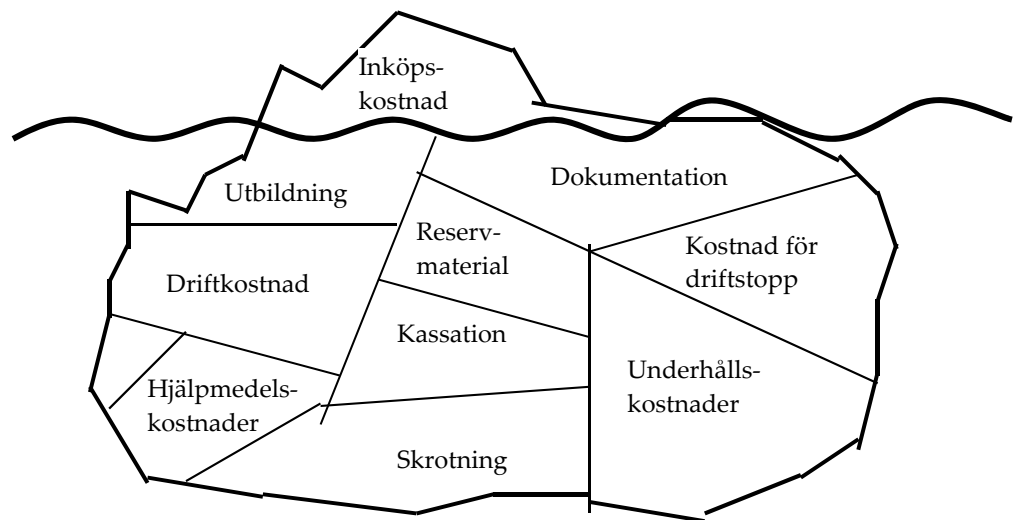
Tillverkningskostnad för en provstav varierar beroende på provstavstyp (kan röra sig mellan ca 300-6000 kr) och reparationer måste utföras med stor omsorg.

I exemplet med slagprovning av en svets inklusive reparation av svetsen skulle kostnaderna kunna uppskattas till i storleksordningen 30 000– 40 000 kr med beaktande av:

|                              |                    |
|------------------------------|--------------------|
| Materialuttag                | 6 timmar à 500 kr  |
| Provstavstillverkning        | 10 st à 400 kr     |
| Provning                     | 2 timmar à 750 kr  |
| Utvärdering och rapportering | 5 timmar à 1000 kr |
| Planering av reparation, WPS | 16 timmar à 750 kr |
| Reparation                   | 8 timmar à 750kr   |

### 1.10.5 Life cycle cost analyser

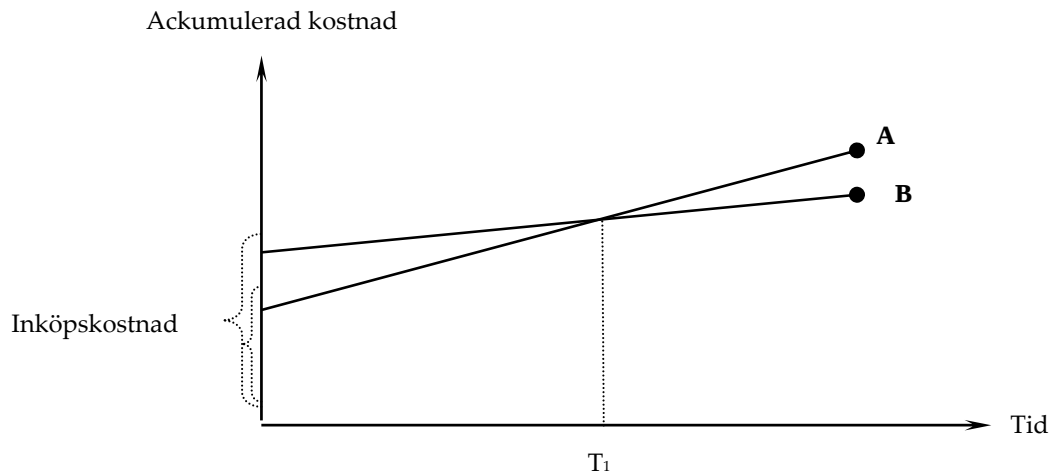
Den riktiga kostnaden för ägande eller utnyttjande av en utrustning är inte endast anskaffningskostnaden utan också alla kostnader som orsakas av installation, drift, logistik, och slutligen skrotningen. Inköpskostnad är bara en del av kostnaderna för en utrustnings livstidskostnader. Livstidskostnader kan liknas vid ett isberg där den synliga lilla delen utgörs av inköpspris medan det mesta av livstidskostnaderna ligger under vattenytan, se Figur 1.10-10.



**Figur 1.10-10** Det så kallade "isberget" som illustrerar att livstidskostnaden för ett system innefattar alla kostnader under systemets livslängd, inte bara inköpskostnaden, vilket är den synliga kostnaden ovanför vattenytan.

**Figure 1.10-10** The so called "iceberg" which illustrates that life cycle costs for a system includes all the costs under systems lifetime, not only the acquisition cost which is visible above the water surface.

Den utrustning som är billigast i inköp kanske inte är bäst för ett företag när livstidskostnader jämförs. I Figur 1.10-11 visas ett exempel. Utrustning "A" har lägre inköpspris än "B". Men en jämförelse med ackumulerade kostnader under drifttid visar att utrustningen "A" som är billigast i inköp kommer att bli den dyraste utrustningen för företaget om den skall användas längre än tiden  $T_1$ . Om utrustningen skall användas till tiden  $T_1$ , är val av "A" lönsammare och vid längre tid ( $>T_1$ ), är val av "B" lönsammast. Denna typ av livstidskostnader har använts under relativt lång tid av krigsindustrin i USA. Det är härifrån uttrycket för livstidskostnad "LCC" (Life Cycle Cost) har kommit.



**Figur 1.10-11** En illustration av val av alternativ utrustning med lägsta livstidskostnad. Utrustning "A" har lägre LCC om användningstiden är mindre än " $T_1$ " men högre LCC om användningstiden är mer än " $T_1$ ".

**Figure 1.10-11** An illustration of the selection of alternative equipment with the lowest LCC. Equipment "A" has lower LCC if the usage time is lesser than " $T_1$ " but higher LCC if the usage time is more than " $T_1$ ".

En sammanvägd summa av ägarens förväntade totalkostnader och uppoffringar för ett system under dess livslängd kallas livstidskostnader. En LCC-analys är en tillämpning av en metodisk insats för att bättre förstå och styra ett systems livstidskostnad. Användning av LCC-analys för design, utveckling eller anskaffning av en produkt har blivit populär på senare tid. En LCC-analys är i många avseenden mer konst än vetenskap. Hur detaljerad en LCC-analys bör vara beror på syftet med analysen. Det vanligaste syftet med en LCC-analys är avvägningar och val mellan olika alternativ. Då är den absoluta nivån för LCC inte det viktiga utan det viktiga är att man genom LCC får en konsekvent rangordning av alternativen. LCC analysen består av bara särskiljande kostnader och kraven på säkerheten i indata kan sänkas genom att alla alternativ analyseras med samma basdata. I praktiken är det nästan omöjligt att förutsäga exakt teknisk livslängd eller kostnadsutvecklingen för en längre framtid. LCC för kortare tid eller LCC per år kan jämföras i sådana situationer. Analysen görs om och förfinas gång efter annan på allt bättre och säkrare underlag allteftersom verksamheten fortskrider. Analysarbetet är till sin natur en iterativa process.

En LCC-analys kan bestå av följande arbetsgångar:

- *Identifiering av uppgiften:* Detta innebär en förklaring av syftet med analysen, t.ex. vilka beslut som ska fattas, när det ska vara klart samt tänkbara alternativ som ska behandlas.
- *Fastställande av ambitionsnivå och formulering av mål:* Analysen ska möta de kvalitetskrav som ställs med hänsyn till tidplan, underlag och egenskaper hos alternativen. Målet med analysen ska preciseras och formuleras så enkelt som möjligt. Detta underlättar rensning av icke relevanta parametrar från början.
- *Planering av analysen:* Detaljplanering är viktig för att prioritera olika moment i analysen. Insamling av data för analysen kan påverkas av den yttre omvärlden (tillverkare, leverantör, drift och underhållspersonal).



- *Förutsättningar:* De viktigaste förutsättningar för LCC analysen är:
  - (a) Ekonomiska förutsättningar: Livslängdskostnaderna och intäkterna från ett system diskonteras till en fix tidpunkt eller räknas om till en årlig annuitet för att jämföra alternativen. Dessa kräver parametrar som kalkylränta, kalkylperiod, inflation och livslängd.
  - (b) Underhållskoncept: Underhållskostnader påverkas av underhållskoncept t ex outsourcing, egen regi, centraliserat underhåll eller decentraliserat underhåll. LCC-analys ska användas för att välja det mest effektiva konceptet. I tidiga stadier bör man nöja sig med ge riktlinjer för underhållet, ett underhållskoncept, och basera LCC-analysen på kostnader för detta.
  - (c) Driftprofil och principer för värdering av driftsäkerhet: Om driftkostnaderna inte är försumbara, är det viktigt att förutsättningar för driften är givna. Driftsäkerhetsparametrar ska också vara givna för dimensionering av reservkapacitet, redundanser, reservdelar och reservaggregat.
  - (d) Regler för utvärdering: Resultat av en LCC-analys är helt beroende av beslutskriterier och andra förutsättningar. Därför det är viktigt att regler eller måtten för utvärderingen av en LCC-analys måste ske tidigt och dokumenteras. Resultat av en LCC-analys kan ge olika svar om reglerna för beslutskriterierna ändras. Exempel på beslutskriterier är effektivitet, tillgänglighet och specifikationer jämfört med livstidskostnader.
- *Referenslösningar:* I början av LCC-analys tar man fram en lösning för projektets tekniska referenslösning samt för drift och underhåll. Denna lösning uppfyller de funktionella kraven och karaktäriseras av ett antal egenskaper och kännetecknas av en viss LCC. Denna lösning kan ändras genom nya beslut, ändringar eller begränsningar. Man tar därefter fram andra lösningar som får utmana den gällande lösningen. Man får en ny referenslösning om den nya lösningen är bättre än den gällande. Den nya referenslösningen uppdateras fortlöpande så ofta projektvillkoren tillåter.
- *LCC-modell:* En LCC-modell ska vara lättanvänd, tillförlitlig och begriplig för beslutfattare. En LCC-modell är en kostnadsmodell, som är baserad på tekniska och ekonomiska parametrar. Dessutom ska den avbilda eller förutsäga väsentliga kostnader under ett systems planerade livstid. Vad som menas med väsentliga kostnader beror på LCC-analysens mål och på vilka utvärderingskriterier som valts. Den kan vara relativt enkel eller mycket komplex, matematiskt avancerad eller trivial samt manuell eller datoriserad. En LCC-modell består huvudsakligen av två typer av livstidskostnader: kostnader före ett system eller en utrustning tas i drift och kostnader under drift till skrotning. En beskrivning av olika LCC-modeller och kostnadselement kan läsas i (Blanchard 1978); (Fabrycky 1991); och (Blanks 1992). Nedan följer ett exempel på en mycket enkel kostnadsmodell för en LCC-analys (Mekanresultat 1984).

$$LCC = I + N(D + U + S) - R$$

där,

I = Initialkostnader

N = Livstidsfaktor i år

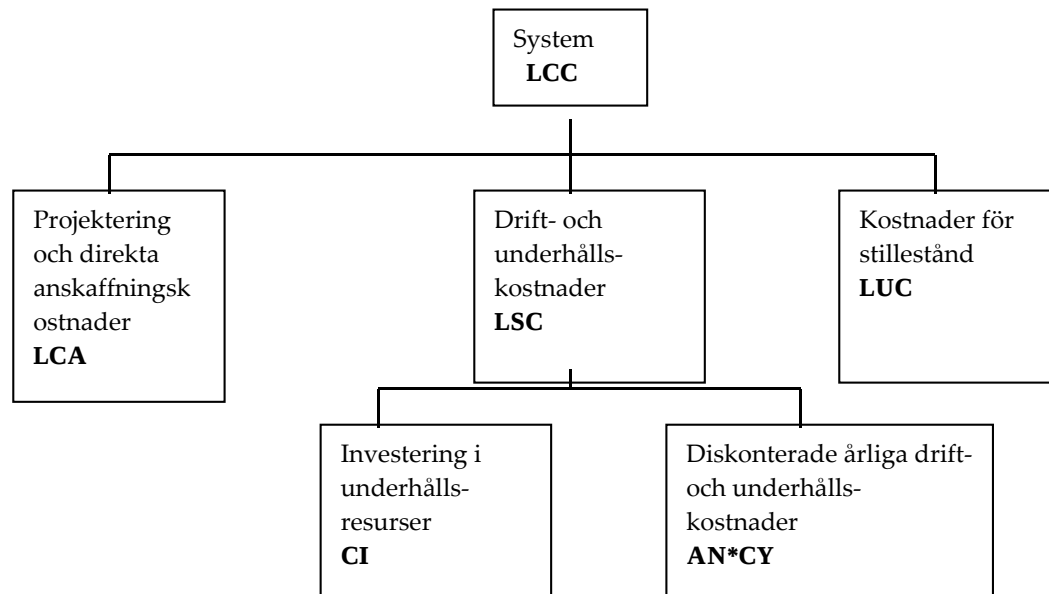
D = Driftkostnader per år

U = Underhållskostnader per år, direkta kostnader

S = Stillaständeskostnader per år, intäktsförluster

R = Restvärde

I denna modell har ingen diskontering av framtida kostnader använts. En vanlig metod att bygga LCC-modeller är att använda kostnadsnedbrytning. En kostnadsnedbrytning är en successiv uppdelning av kostnader, i allmänhet hierarkiskt, ned till den nivå som är nödvändig för att alternativens kostnadsmässiga konsekvenser ska kunna särskiljas. En sådan nedbrytning illustreras i Figur 1.10-12. Målsättningen är att speciellt studera drift- och underhållskostnader.



Figur 1.10-12 Ett exempel på kostnadsnedbrytning i en LCC-modell.

Figure 1.10-12 An example of breakdown of cost structure in a LCC-model.

Matematiskt kan den ovanstående LCC-modellen uttryckas som:

$$\mathbf{LCC} = \mathbf{LCA} + \mathbf{LSC} + \mathbf{LUC}$$

där,

**LCA** = Projektering och direkta anskaffningskostnader.

**LSC** = Logistic support cost – kostnader för drift och underhåll, inklusive nödvändiga investeringar härför.

**LUC** = Life Unavailability costs – kostnader för stillestånd.

**LSC** är de kostnader som berör drift och underhåll och kan uppdelas i olika nivåer:

$$\mathbf{LSC} = \mathbf{CI} + \mathbf{AP} \times \mathbf{CY}$$

där,

**CI** = Investeringskostnad

**AP** = Applikationsfaktorer som transformerar årliga kostnader till investering.

**CY** = Årliga kostnader

**CI** och **CY** kan också uppdelas i olika nivåer:

$$\mathbf{CI} = \mathbf{CIE} + \mathbf{CIV} + \mathbf{CIR} + \mathbf{CID} + \mathbf{CIT}$$

$$\mathbf{CY} = \mathbf{CYE} + \mathbf{CYV} + \mathbf{CYR} + \mathbf{CYD} + \mathbf{CYT} + \mathbf{CYA} + \mathbf{CYP} + \mathbf{CYC} + \mathbf{CYS}$$

där **CI** är summan av kostnadselementen

**CIE** = Lokaler för underhåll.

**CIV** = Underhållsutrustning

**CIR** = Initial anskaffning av reservmaterial.

**CIT** = Initial utbildning.

De årliga kostnaderna, **CY** är summan av kostnadselementen:

**CYE** = Skötsel av lokaler av underhåll.

**CYV** = Nyttjande och underhåll av underhållsutrustning.

**CYR** = Återanskaffning av förbrukade reservenheter.

**CYD** = Ändring och uppdatering av dokument.

**CYT** = Återkommande utbildning.

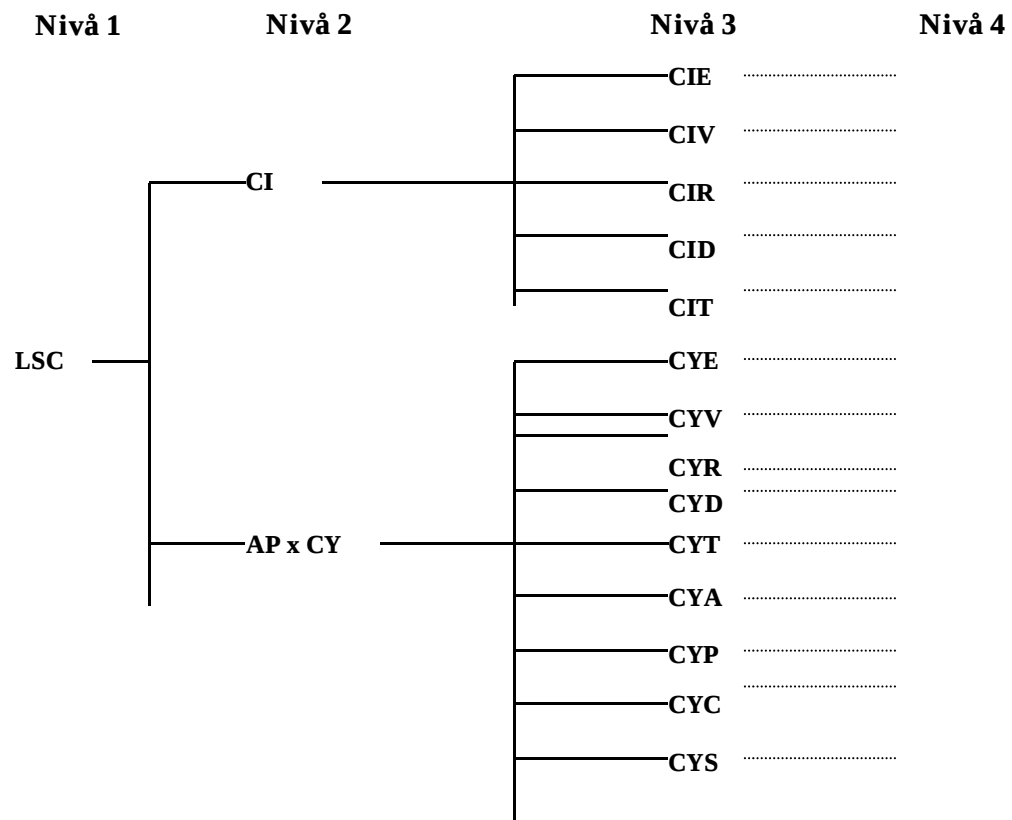
**CYA** = Avhjälpan underhåll på plats.

**CYP** = Förebyggande underhåll på plats.

**CYC** = Reparation av utbytesenheter på verkstad.

**CYS** = Stillestånd

En vanlig teknik att åskådliggöra strukturer är med hjälp av ett så kallat pinträd. Presenterat på det sättet blir nu **LSC** strukturen det som visas i Figur 1.10-13.



Figur 1.10-13 Ett exempel på strukturerad kostnadsnedbrytning i en LCC-modell.

Figure 1.10-13 An example of breakdown of cost structure in a LCC-modell.

Vid en LCC-analys måste följande beaktas:

- *Data för analysen:* Brist eller osäkerhet på indata för LCC-analys är inte ett så stort problem så länge om ändamålen är prioritering och val av alternativ. En bra känsla för rimliga data skall räcka till. För budgetering och planering krävs kvalitets säkra indata.
- *Alternativgenerering:* Normalt resulterar en LCC-analys i ett antal alternativ beroende på olika referenslösningar. Ett alternativ bör inte uteslutas på grund av analysmetoden eller brist på indata.
- *Känslighetsanalys:* Variationen i alla osäkra parametrar i kombination med andra viktiga parametrar i analysen skall undersökas i en känslighetsanalys. Påverkan av oberoende parametrar skall jämföras och sammanfattas i form av en tabell eller en figur i en känslighetsanalys. Denna blir lättare att hantera om beräkningarna är automatiserade i någon form.
- *Dokumentation:* Dokumentering av analysresultat ska sammanfatta ovannämnda arbetsgångar och även omfatta en beskrivning av deras svagheter och möjligheter. Beslutsfattare måste även få en inblick i kvalitetsnivån på basuppgifterna.

## REFERENSER

- Andersson P.; Samuelson Å. & Segle P. 1997. Expert system för dimensionering, dokumentation, och livslängdsprediktering av högtemperaturkomponenter-utvärdering, SAQ/FoU-Report 97/08.
- Bergman B. & Klefsjö B. 1996. Tillförlitlighet, Studentlitteratur, Universitetsstryck Luleå.
- Bergknut P., Elmgren-Warberg J. & Hentzel M. 1993. Investering i teori och praktik, Studentlitteratur, Lund.
- Blanchard B.S. 1978. Design and manage to life cycle cost, M/A press, Portland, USA.
- Blanks H.S. 1992. Reliability in procurement and use, John Wiley & Sons, New York, USA.
- Fabrycky W.J. & Blanchard B.S. 1991. Life-cycle cost and economic analysis, Prentice Hall, New Jersey, USA.
- Jardine A. K. S. 1973. Maintenance, replacement and reliability, John Wiley & Sons, London, UK.
- Johansson K.E. 1991. Driftsäkerhet och underhåll, Studentlitteratur, Lund.
- Kumar D. & Westberg U. 1997. Maintenance scheduling under age replacement policy using proportional hazards model and TTT-plotting, European journal of Operational Research, Vol 99, Nr 3.
- Mekanresultat 1984. LCC – en teknik att påverka totalkostnaden under en produkts livslängd, Sveriges Mekanförbund, Stockholm.

## 1.11 PRAKTISK HANTERING AV LIVSLÄNGDSARBETE

### 1.11.1 Mål med livslängdsarbete på system- och komponentnivå

I kapitel 4 beskrivs övergripande strategier och mål för livslängdsanalysen på anläggningsnivå. För att uppnå målen fordras livslängdsarbete med anläggningens system och komponenter. På system och komponentnivå är målen mer detaljerade för en livslängdsanalys och en bedömning av den återstående livslängden. Genom att använda data av konstruktion, drift, historik samt resultat av i första hand oförstörande provning, men om så krävs och är möjligt även förstörande provning, kan generellt sett följande mål uppnås:

- i) Att identifiera skademekanism och grad av skada.
- ii) Bedöma den återstående livslängd som kan nyttjas.
- iii) Att använda införskaffad information till att utforma rekommendationer till åtgärder för att förlänga livslängden på komponenten eller systemet i fråga.
- iv) Erhålla grunddata till ett program för provning och övervakning.

Andra mål som kan uppnås är att:

- i) Bestämma komponentens eller systemets nuvarande prestanda och identifiera hur reducerade prestanda påverkar anläggningens produktivitet.
- ii) Att använda införskaffad information till att utveckla förbättrade prestanda och ett åtgärdsprogram för detta.
- iii) Erhålla grunddata till ett program för underhåll.
- iv) Erhålla grunddata till ett program för utbildning.

### 1.11.2 Insamling och hantering av information

I kapitel 1.2 och 1.3 finns metodik beskriven för hur livslängdsarbete kan och bör bedrivas. Vad gäller insamling av driftdata, -historik och provningsdata från tidigare provning så anges i övergripande ordalag vad som idealt bör ingå, se **avsnitt 1.3.3.1**, och hur detaljnivån i det som samlas in inverkar på hur noggranna bedömningar som kan göras, se **avsnitt 1.3.4.1**. I verkligheten är det inte sällan en hel del uppgifter som saknas när det är dags att genomföra de analyser som planerats. Det kan till exempel bero på följande orsaker:

1. Önskad information finns ej uppmätt eller registrerad.
2. Önskad information är svårtillgänglig och man har inte kunnat, eller så har man inte tagit sig tid eller råd att, ta fram denna från befintlig dokumentation.

Om sådana problem uppstår är det väsentligt att åtgärda dem inför framtiden genom att införa de mätningar som erfordras och att upprätta en logisk och användarvänlig databas där även äldre data ska kunna läggas in. Databasen förenklar processen för bedömningar av kondition och återstående livslängd. Man kan också enkelt göra uppdateringar och revideringar vilket är en viktig del i ett livslängdsarbete.

I Tabell 1.11-1 listas de olika typer av information som erfordras, dels inför en övergripande planering av livslängdsarbetet och dels inför provning och en livslängdsanalys.

Tabell 1.11-1 Erforderlig information för en livslängdsanalys.

| Typ av information                             | Övergripande planering av livslängdsarbete | Provning och livslängdsanalys |
|------------------------------------------------|--------------------------------------------|-------------------------------|
| Ritningar                                      |                                            | x                             |
| Designdata                                     |                                            | x                             |
| Driftdata                                      |                                            | x                             |
| Drifthistoria                                  |                                            | x                             |
| Historik av inspektion, provning och underhåll | x                                          | x                             |
| Erfarenhet med liknande utrustning             | x                                          | x                             |
| Nationella/internationella normer och regler   | x                                          | x                             |
| Systembeskrivning                              | x                                          | x                             |

En annan, liknande, beskrivning av erforderlig information för livslängdsanalys enligt EPRIs metod med tre noggrannhetsnivåer och en beskrivning av kompletterande insamling av data, utgående från analysens noggrannhet, finns i **avsnitt 1.3.4.1** respektive **1.3.4.2**.

#### 1.11.2.1 Dimensionering och konstruktion

Vad gäller dimensionering, konstruktion och tillverkning erfordras i detalj:

- Dimensioneringsunderlag och konstruktionsnorm/nationell standard i original.
- Ritningar och tillverkningsunderlag
- Konstruktionsmaterial
- Kvalitetssäkring och –kontroll samt provning utförd under tillverkning.
- Översiktlig och detaljerad processbeskrivning

#### 1.11.2.2 Historik av drift och utrustning

En granskning av drifthistorik och utrustningens historik är ett nyckelsteg i livslängdsarbetet. Ingen eller dålig kännedom om denna historik ökar väsentligt, och i många fall högst väsentligt, osäkerheten av värderingar och bedömningar som har med återstående livslängd att göra. Grundinformationen består av nominella driftdata och de driftdata som förelegat i verkligheten. Följande driftparametrar är väsentliga för de flesta komponenter i anläggningen:

- Temperatur
- Tryck
- Drifttid
- Antal kall- och varmstarter samt stopp.
- Stilleståndstid
- Eventuella avvikelser från normal drift, till exempel snabbstopp och vibrationer.
- Driftmiljö
- Mediets kvalitet

Om temperatur, tryck eller frekvensen av starter och stopp eller driftmiljön varierat under anläggningens drifthistoria ska detta kartläggas tillsammans med eventuella avvikelser. Dessutom ska följande granskas:

- Historik av inspektion, provning och underhåll. Utöver att gå igenom den dokumentation som kan hittas kan det ibland vara nödvändigt att intervjua personal. Detta bör ske i de fall där tillgänglig dokumentation är bristfällig och personal i fråga kan förväntas tillföra användbar information.
- Eventuella reparationer, modifieringar, komponentbyten och förändringar i driftsätt. Även här bör personal intervjuas om dokumentation saknas eller inte är tillfredsställande.  
Det är inte ovanligt att reparationer är undermåligt utförda och haverier har inträffat på grund av detta. Undermåliga reparationer saknar också ofta ingen eller dålig dokumentation.

#### 1.11.2.3 Hantering av data från provning och övervakande kontrollutrustning

Generellt måste följande förutsättningar uppfyllas för att provning och övervakning ska vara tillfredsställande:

- Rätt storhet bör mätas på rätt ställe i anläggningen.
- Relevant provning bör utföras på rätt ställe i anläggningen.
- Mät- och provningsresultatet ska återspegla de faktiska förhållandena.
- Mät- och provningsresultat ska kunna tolkas.
- 

Dessutom ska syftet med all slags mätning och provning som inte ter sig helt självklar beskrivas och kunna motiveras.

#### *Matarvattensystem*

I matarvattensystem uppmäts följande:

- Vattenanalys
- Ångtryck
- Ång- och vattentemperatur

Kontrollen och övervakningen omfattar i huvudsak provtagning och analyser av de olika leden i anläggningens processer. Dessutom bevakas t ex tryckfall över filter och kontroll av driftinstrument för mätning av pH-värde och konduktivitet med mera. Mer ingående beskrivning av kontroll och övervakning finns i kapitel 11 i Värmeforsks handbok i vattenkemi för energianläggningar, Värmeforsk nr 729. Riktlinjer för hur en bra övervakning av vattenbehandling i ång- och hetvattensystem saknas i dagsläget. Därför bör de behov som finns specificeras helt och hållet av kunnig personal i varje anläggning.

Analysresultat och relevanta driftparametrar journalförs. Ett syfte med journaler är att kunna följa driften över längre tidsperioder och upptäcka långsamma förändringar. Ett annat syfte är att underlätta eventuella skadeutredningar. Journalföring finns ofta inbyggt i datoriserade driftövervakningssystem med en lagring av tidsmedelvärden för de parametrar som övervakas kontinuerligt. För matarvattenanalyser mäts vanligen tidsmedelvärdet per timme. I fall med så pass långa tidsintervall eller längre bör journalföringen kompletteras med manuell registrering av momentana förlopp då sådana föreligger eftersom de inte lagras automatiskt. Eventuell manuell analys eller instrumentell analys som inte registreras i driftövervakningssystemet journalförs separat.



Vid en utvärdering av journalerna bör analysresultat och driftparametrar presenteras i diagram med tiden på ena axeln.

Relevanta driftparametrar som bör journalföras kan t ex vara tryckfall och flöde över ett RO (omvänd osmos) –aggregat för en övervakning av membranets egenskaper och intervall mellan regenereringarna för en jonbyteslinje. Kemikalieförbrukningen bör också noteras.

Även mätningar av tryck och temperatur på vatten och ånga i matarvatten systemen journalförs. Instrument för mätning av tryck och temperatur ska kontrolleras och kalibreras enligt tillverkarens föreskrifter.

Provningsdata av matarvattensystemen ska, precis som i alla andra system, hanteras på ett rationellt sätt. Provningsen består t ex av spricksökning i svetsar, visuell inspektion av tankar och godstjockleksmätning av matarvattenledningar. Det är viktigt att följande blir överskådligt:

- Provningens uppläggning
- Omfattning
- Positionering

Enskilda provdata likaväl som slutsatserna av provningen ska vara presenterade så att de olika provningstillfällen enkelt kan jämföras.

#### *Pannor*

Normalt finns det mätpunkter för ångtemperaturen i pannans olika delar. Beroende t ex på anläggningens utformning och det bränsle som används kan det finnas större eller mindre förutsättningar för att överhettningar kan inträffa. I många fall kan det rekommenderas att komplettera antalet mätpunkter för att kunna övervaka temperaturen. På kritiska delar av överhettare kan det också vara aktuellt att mäta metalltemperaturen på utsidan med termoelement.

Särskilt vid temperaturer som är i höjd med eller över den temperatur då materialet börjar krypa är det viktigt med en noggrann temperaturmätning. Gränstemperaturen för krypning varierar mellan ca 350-480°C beroende på material. Kontinuerlig och noggrann mätning av temperaturer i kryptområdet som även registrerar eventuella påtagliga temperaturvariationer under dygnet och även i ett långtidsperspektiv ger möjlighet till mer precisa bedömningar av kryplivslängden.

Temperaturövervakning på flera punkter längs ånglådor förekommer. Syftet med en sådan övervakning är att registrera eventuella temperaturskillnader längs lådan vilket kan indikera fel i driften som bör åtgärdas. Det är också möjligt att i samma syfte installera mätare av ångflödet i olika tuber fördelat längs ånglådor till i överhettare [Shoemaker 1992].

Rökgastemperaturen mäts i pannans olika stråk. Denna temperatur behöver inte registreras kontinuerligt i reguljär drift. Om bränslen eller bränsleblandningar ändras är det dock viktigt att ha en mer frekvent registrering av rökgastemperaturen. Vid driftförhållanden där stråkbildning av rökgaserna kan inträffa bör rökgastemperaturen mätas, utöver på höjdlägenheter även i sidled. Detta är dock inte en säker metod att identifiera stråkbildning eftersom stråken kan vara mycket lokalt avgränsade.

Analys av rökgaser utförs med jämna mellanrum. Om bränslet varierar bör mätfrekvensen vara anpassad för detta. Analysresultaten arkiveras gemensamt och bör

även läggas in på datafiler som snabbt kan tas fram för att underlätta konditions- och livslängdsanalyser eller eventuella skadeutredningar.

### *Ångledningar*

På ångledningar registreras tryck och temperatur från givare i små stutsar som är fastsvetsade längs ångledningen. Om trycket varierar över dygnet är det värdefullt att registrera dessa. Hög noggrannheten i temperaturmätning är viktigt, särskilt i krypområdet där små temperaturskillnader har en stor inverkan på kryplivslängden. I tysk standard görs ett temperaturtillägg på +5°C på den temperatur som uppges vara drifttemperatur vid krypberäkningar på komponenter i drift. Man gör detta för att gardera sig på ett konservativt sätt mot mätfel i temperatur.

Töjningsövervakning kan förekomma t ex på kritiska positioner på formstycken. Några av dessa metoder beskrivs i korthet i **avsnitt 2.2.3.2**. Dels finns det metoder där töjningen avläses på komponenten vid driftstopp och dels finns töjningsgivare som kan ge en kontinuerlig avläsning i drift. I båda fallen bör töjningen plottas mot drifttiden i ett diagram allt eftersom data insamlas för att hålla kontroll på utvecklingen. Vid en kontinuerlig mätning kan det räcka med att nya data läggs in i diagrammet från en gång i veckan till en gång i månaden, beroende på omständigheterna.

Det finns också datoriserade system som tar hand om signaler från sensorer för till exempel tryck och temperaturmätning. Sådana system kan utöver datainsamling även omfatta moduler med verifiering och registrering av data, databas, presentation av t ex spänning för en önskad position på en komponent samt en modul som med inlagda formler för t ex materialets degenerering och spricktillväxt, beräknar den återstående livslängden med de data som insamlats [Jones 1995].

### *Turboaggregat*

Som framgår av kapitlen om turbiner och generatorer i handbokens del 2 har denna anläggningsdel ett stort antal komponenter av skilda slag som också undersöks med ett stort antal olika metoder. Gemensamt med andra anläggningsdelar är att insamlade data bör behandlas såsom beskrivet ovan.

En skillnad är att många insatser kräver ett rotorlyft vilket för ångturbiner normalt görs relativt sällan. Beroende på driftsätt är intervallet för ett rotorlyft typiskt mellan 6 och 10 år. Ett annat mått är 40-50 tusen ekvivalenta drifttimmar. Detta innebär att det är än viktigare att ta till vara på tillfället både vad gäller erforderliga undersökningar och resultaten av dessa. Det innebär också att man inte kan följa en skadeutveckling på samma sätt som för andra anläggningsdelar och man får vara beredd på att komponenter kan bli utdömda och bör bytas/renoveras/uppgraderas på ett stadium av livslängden som kan bedömas vara mycket tidigare än för komponenter som utan större svårigheter kan kontrolleras årligen.

Ett exempel på övervakande utrustning på turbiner är vibrationsmätning. Man kan ställa in en otillåten nivå på vibrationerna där turbinen stängs av då den otillåtna nivån överskrids. Det är viktigt att spara mätningarna även om inget onormalt inträffar. Risken är annars mycket stor att man sent upptäcker onormal drift och att den drifthistorien går förlorad. Dokumentation på vibrationerna innan ett larm inträffar har ett mycket stort värde då det gäller att analysera vad felet kan bero på och att uppskatta inverkan på återstående livslängd. Andra vanliga storheter som mäts och övervakas på turbinen är tryck samt temperatur på ånga och olja.

#### 1.11.2.4 Erfarenheter av liknande utrustning

Erfarenheter av liknande utrustning eller komponent i andra anläggningar ger en fingervisning om vanliga skador som uppstår. Detta bidrar till att identifiera lämpliga positioner för, och omfattning av, provningsinsatser. Inte desto mindre är varje anläggning unik och användning av andras erfarenheter bör inte ske utan reservation för att det kan finnas ytterligare kritiska delar av den egna utrustningen eller komponenten.

Det är inte ovanligt att en del önskvärda data för den egna anläggningen saknas. För att övervinna sådana problem har det förekommit att företag har samarbetat med att samla in data från definierade grupper av komponenter i databaser. Ett exempel är Värmeforsks databas på överhettarkorrosion. De största databaserna är dock framtagna inom andra industrier, till exempel OREDA (off-shore reliability data), inom off-shore industrin, och ICDE (International common cause failure data exchange project), inom kärnkraftsindustrin.

Utnyttjande av databaser i syfte att komplettera den information som kan erhållas från den egna anläggningen måste göras med stor försiktighet eftersom de data som kan erhållas inte alltid är relaterade till inspektion, underhåll och driftsätt för den aktuella komponenten. Användbarheten av data i databaser beror på många parametrar, se tabell 1.11-2.

**Tabell 1.11-2 Hänsynstaganden vid användning av skadedatabaser**

| Faktorer som påverkar komponentens felfrekvens |                                                                              |
|------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| Industri (samma eller liknande)                | Processvätska och kemisk kontroll                                            |
| Typ av anläggning (storlek och typ av bränsle) | Tillverkare                                                                  |
| Inspektionssystem/program/teknik               | Geografisk belägenhet (miljö och yttre påverkan), unik process, design, etc. |
| Driftparametrar (tryck, vibrationer, etc.)     | Utrustningens/komponentens storlek, modell, design etc.                      |
| Driftmiljö (fukt, temperatur, etc.)            | Systemfel                                                                    |

#### 1.11.3 Upphandling av livslängdsarbete

Det finns olika metoder för att komma fram till en lämplig rankning av system och komponenter att undersöka, se **avsnitt 1.3.3.2**. Dessutom ska det avgöras hur omfattande utvalda komponenter bör undersökas. Genom att studera de avsnitt i handboken som är aktuella för det livslängdsarbete som man avser att upphandla, kan en konstruktiv dialog lättare föras med konsulter på området. Därmed ökar möjligheterna till att den upphandling av livslängdsarbete som görs motsvarar de verkliga behoven.

Övergripande strategi och metodval blir vanligen anpassat individuellt för varje anläggning. Kompetens på och tid till livslängdsarbete inom anläggningsägarens egen organisation varierar också från anläggning till anläggning och behovet av utomstående konsult hjälp kan därför, vad gäller strategi och metodval, variera stort. I det här stadiet är det tillrådligt att hålla en aktiv dialog med anlitade eller tilltänkta konsulter, förslagsvis i form av en projektgrupp (se **avsnitt 1.3.2.2**), så att de metoder som kommer att användas också kan utföras på bästa sätt.

Det kan förutspås att de metoder för en systematisk hantering av provning och underhåll som utvecklats och är under utveckling, t ex riskbaserade inspektioner och riskbaserat underhåll, se [kapitel 1.9](#), kommer att tillämpas alltmer frekvent. Innan eller i samband med upphandling av expertis för att kunna genomföra sådana metoder är det tillrådligt att utbilda sig, åtminstone till den grad att metoderna i fråga inte känns främmande och få en förståelse för vad tillämpningen kommer att innebära i praktiken.

Vid upphandling av livslängdsarbete på komponentnivå bör följande krav ställas på det utförande företaget:

- i) Teknisk kompetens.
- ii) Att tillräckligt med kompetent personal för de uppgifter som ska utföras kan tillhandahållas inom uppgjorda tidsramar.
- iii) Att nödvändig provningsutrustning finns att tillgå.
- iv) Att provningsutrustningen är kalibrerad enligt föreskrifterna.
- v) Att provning utförs av behörig personal för respektive provningsmetod. För provningsmetoder där certifiering saknas krävs det yrkesutbildad och yrkesvan personal för den aktuella provningen. Medverkan av assisterande personal utan formell eller informell behörighet får ske under förutsättning att de inte har något ansvar för provningen.
- vi) Att erforderlig mjukvara finns att tillgå i fall av spännings- och/eller brottmekaniska analyser.
- vii) Att erforderlig laboratorieutrustning finns att tillgå.
- viii) Att eventuell förstörande provning utförs enligt gällande normer.
- ix) Att alla resultat dokumenteras och att rapporteringen sker på ett tillbörligt sätt, se avsnitten **1.11.4** och **1.3.7**.

Vid upphandling av livslängdsarbete med specifika komponenter är det i första hand anläggningsägarens uppgift att ta fram ett erforderligt anbuds-/planeringsunderlag enligt punkterna i Tabell 11.1. Ofta genomförs ett inledande arbete i form av en mer grundlig genomgång av arkiv och andra informationskällor i samråd och medverkan av utomstående expertis. Denna genomgång kompletterar en eventuell nulägesbeskrivning. Generell arbetsgång för genomförande av livslängdsarbete på komponentnivå återges i **avsnitt 1.3.4**.

#### 1.11.4 Dokumentation och rapportering

##### *Nulägesbeskrivning*

En nulägesbeskrivning syftar till att ta fram underlag för att avgöra om livslängdsanalysen ska genomföras eller inte. Innehållet i en sådan beskrivs i **avsnitt 1.3.1**. Utöver att det underlag som tagits fram skall dokumenteras i en rapport så bör rapporten också innehålla en klargörande diskussion av underlaget som också åskådliggör de slutsatser som kan dras.

*Övergripande planering av livslängdsarbete*

Den övergripande planeringen beskrivs i **avsnitt 1.3.2**. Innehållet i en övergripande plan återges i **avsnitt 1.3.2.7**. Alla punkter i **avsnitt 1.3.2.7** ska ingå i planen.

*Detaljerad planering av livslängdsarbete*

En detaljerad planering utförs innan en livslängdsanalys påbörjas. Beroende på resultat uppdateras sedan planeringen under livslängdsarbetet. I en detaljerad planering ingår följande:

- Insamling av data.
- Rankning av system.
- Förfinad kostnads- och nyttouppskattning.
- Förfinad plan för livslängdsarbetet.

Insamlade data läggs in i databasen eller på excelark om en databas ännu inte har upprättats.

Vid rankning av system rapporteras tillvägagångssättet så väl som resultatet i detalj.

Förfinade kostnads- och nyttouppskattningar samt planer för livslängdsarbetet uppdateras successivt efterhand arbetet fortskrider. Det kan vara praktiskt att utforma ursprungliga dokument så att uppdateringar kan läggas in överskådligt.

*Planering av inspektion och provning*

Denna planering dokumenteras och ska inkludera en checklista. Dessutom måste tydliga instruktioner utformas till dem som ska utföra arbetet. En muntlig genomgång av de skriftliga instruktionerna rekommenderas.

Instruktionen kan exempelvis innehålla:

- Ritningsunderlag med utmarkerade positioner för provning
- Provningsmetod
- Förutsättningar för provning
- Protokoll

*Resultat av inspektion och provning*

För certifierade provningsmetoder finns normalt standardiserade provningsprotokoll där den information som erfordras uppges och nedtecknas i anslutande ifyllningsrutor. Ibland är kompletterande information önskvärd. Till exempel är provningsförhållandena olika svåra vid olika tillfällen och det bör framgå i rapporteringen vilken detekteringsgräns som är eller bedöms vara gällande, dvs. den minsta defektstorlek som kan eller bedöms kunna upptäckas, vid det aktuella provningstillfället.

Vad gäller ej certifierade metoder bör resultaten rapporteras enligt befintliga rekommendationer. Utöver att alla resultat ska redovisas på ett tillbörligt sätt är det viktigt att dokumentera alla provpositioner i detalj.

*Konditions- och livslängdsanalys*

Vid bearbetning av drift- och provningsdata samt annan information skall tillvägagångssättet dokumenteras i detalj. Dels för att proceduren ska kunna upprepas vid en uppdatering av analysen och dels för att man ska veta huruvida resultaten kan jämföras med resultat från andra undersökningar.

Resultatet av en konditions- eller livslängdsanalys ges i en rapport som ska innehålla redogörelser och resultat av alla delmoment där lämpliga delar, såsom tabeller med data, redovisas i bilagor. Rapporten ska även vara strukturerad och med en diskussion av resultaten så att de slutsatser som dras och bedömningar av återstående livslängd eller andra livslängdsfrågor ska kunna granskas.

Angående rapportering, se även **avsnitt 1.3.7**.

**REFERENSER**

- R Shoemaker et al. 1992. Tubemod – a method for extending life and reliability of superheaters and reheaters. Baltica II Int. Conf. on Plant Life Management & extension held 5-6 October 1992 in Helsinki and Stockholm, eds. S Hietanen and P Auerkari.
- G Jones et al. 1995. The "Plus" system on-line operations & software for power plant. VTT symposium 151, Baltica III, Int. conf on plant condition & life management, Vol II.

## 2 MEKANISKA KOMPONENTER

### 2.1 PANNOR

#### 2.1.1 Panntyper och ingående system

##### *Allmänt*

De vanligaste typerna av ångpannor som förekommer i svenska kraft- och kraftvärmeverk beskrivs översiktligt i detta avsnitt.

Ångpannornas storlek varierar mycket och finns med en termisk avgiven effekt på upp till ca 800 MW. Pannorna är utförda för ångtryck upp till drygt 200 bar och med en högsta ångtemperatur på ca 540°C. Vanliga driftdata för kraftvärme pannor i Sverige är 140 bar och 540°C. Effektmässigt ligger de ofta på 100-150 MW el + värme.

De bränslen som används är bland annat naturgas, gasol, processgas, eldningsolja, tallbecksolja, kol, trä, torv, bark, avfall. Träbränslen levereras i form av flis, spån, pulver, pellets briketter med mera. Torv förekommer som frästortv, stycketortv och briketter. Fasta bränslen eldas i styckeform eller som pulver. De använda bränsleslagen har under åren förändrats från i huvudsak olja och kol mot biobränslen. En utveckling mot en mer miljövänlig förbränning har även skett. Pannbeståndet har därmed förändrats för att passa nya förutsättningar. Värmeforskrappport 1234 "Bränslehandboken 2012" redogör i detalj för det stora antal förnyelsebara bränslen som har haft användning under senare tid.

Lokala förutsättningar med tanke på bland annat bränslen, lokalisering, tillstånd, drifttid, behov av kraft- och värmeproduktion och ekonomiska förutsättningar medför en stor variation i pannornas utformning. Pannorna är normalt byggda för ett huvudbränsle som ofta kan kombineras med något eller några andra bränslen. Olika system för vattnets och ångans strömning genom pannans tuber förekommer. De värmeupptagande ytorna arrangeras på olika sätt. Sotningsutrustning, luft- och gassystem med mera anpassas för varje anläggning.

##### *Eldningssystem*

Med hjälp av ett eldningssystem blandas bränsle och luft i, för förbränningen, lämpliga proportioner. De olika bränslena eldas i pannor med brännare, på rost eller med fluidiserad förbränning.

##### Brännare

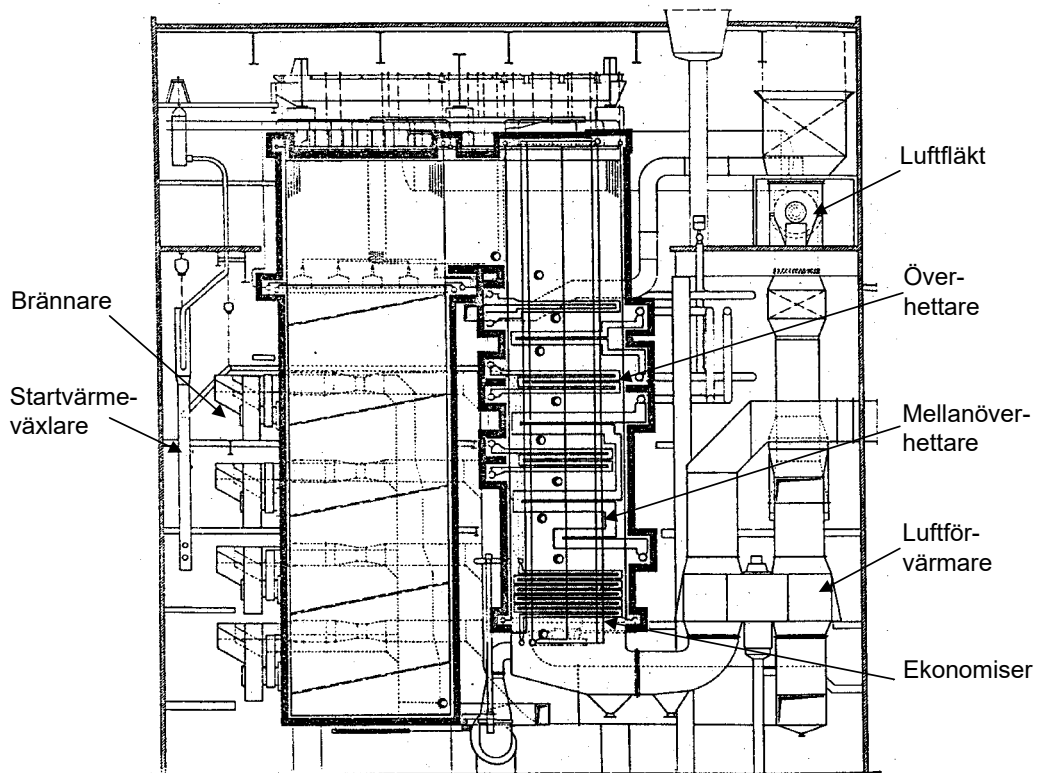
I pannor med brännare eldas gasformiga, flytande och pulverformiga bränslen. Pulverformiga bränslen tillverkas genom malning av till exempel stenkol, torv eller trä. Bränslet kan levereras vanligen till anläggningen i form av ett råmaterial som mals på plats. Vid torv- och träbränslen består råvaran ibland av briketter eller pellets. Bränslenas fukthalt är låg. Partikelstorleken beror på bränsletyp och av kvarnanläggning. Form på partiklarna är också beroende på typ av bränsle, t.ex. mer likformiga partiklar från torv respektive mer långa fibrer från trä. Huvuddelen av partiklarna understiger normalt 0,5 mm.

Med brännaren blandas luft och bränsle. Flytande bränslen finfördelas i brännaren, så kallad atomisering. Detta sker med hjälp av ånga, luft, trycksättning av bränslet eller med en roterande kopp. Trögflytande bränslen förvärms med ånga eller hetvatten innan dessa leds in i brännarna. Brännarna utförs ofta för flera olika bränslen där dessa kan eldas var för sig eller tillsammans.

Brännarna är placerade i pannans eldstad på ett antal olika sätt, till exempel i flera rader i eldstadens nedre del, i eldstadens tak eller placerade ovanför varandra i eldstadens hörn. Förbränningsluften tillförs brännarna genom brännarskåp som kan vara gemensamma för flera brännare eller separata för varje brännare.

Luften fördelas med spjäll i brännarskåpen till olika zoner kring flaman som primär-, sekundär- och eventuellt tertiärluft. I vissa pannor tillförs även luft ovanför brännarna som överluft.

I Figur 2.1-1 nedan visas ett exempel på en oljeeldad panna med 16 brännare i separata brännarskåp placerade i fyra rader i pannfronten. Pannans termiska effekt är ca 750 MW med ångdata 825 t/h, 205 bar och 540°C. Pannan är försedd med mellanöverhettare.



Figur 2.1-1. Panna med brännare.

Figure 2.1-1. Boiler with burners.



Gasformiga och flytande bränslen innehåller i allmänhet så små mängder icke brännbara partiklar att utrustning för utmatning av aska från eldstaden saknas. Vid fasta bränslen finns däremot ofta anordningar för utmatning av bottenaska.

På brännare och brännarskåp förekommer till exempel erosionsskador på brännarmunstycken, rotationskoppar och flamhållare orsakade av slitande bränslen. Aggressiva bränslen kan ge korrosionsskador och delar nära flamman kan överhettas. Skador på murverk i genomföringar i pannväggar är vanliga. Dessa skador är av typ förslitningsskador på slitdelar och påverkar inte pannans livslängd. Slitdelarna repareras eller byts ut i samband med planerat underhåll. Utbyte av äldre brännare med dålig förbränning kan ibland motiveras med att verkningsgraden kan ökas.

### Rost

Fasta bränslen med en styckestorlek från några millimeter upp till flera decimeter, med en fukthalt upp till ca 55 % och med en halt av obrännbara ämnen (anges oftast som askhalt i bränsleanalyser) på upp till ca 30 % eldas på olika typer av roster. Förekommande rosttyper är

- • fast snedrost för bland annat bark, trä och torv,
- • wanderrost i huvudsak för kol,
- • vibrationsrost för flis, spån, bark eller kol,
- • rörlig sned eller plan rost vanligen för avfall men även för flis och bark

Förbränningen på samtliga rosttyper kan indelas i torkzon, förgasningszon och slutförbränningszon. Zonernas storlek beror helt på bränsletyp och fukthalt. Primärluft tillförs under rosten samt sekundär och tertiärluft i eldstaden ovanför rostyten. Bränslet transporteras från inmatningssystemet till schaktet för bottenaska enbart med hjälp av tyngdkraften eller i kombination med en mekanisk rörelse. Vid vibrationsrost och rörlig rost erhålls även en omblandning av bränslet. In- och utmatningssystem för bränsle och slagg utförs med lufttäta anslutningar för att förhindra bränder och insläpp av luft som inte deltar i förbränningen.

Efter det att fukt drivits ut i torkzonen avgår brännbara gaser som förbränns i eldstaden ovanför rostyten. Den fasta återstoden som kräver längre brinntid förbränns sedan på rosten under transport mot utmatningsschaktet där de obrännbara delarna lämnar pannan som bottenaska och aska.

Rostytan hos en rörlig rost är ofta uppbyggd av ett antal utbytbara roststavar som kyla av att primärluften leds genom hål i stavarna eller genom spalter mellan stavarna. Vid hög värmebelastning kan stavarna vara utförda med vattenkylning. För att kyla rosten utnyttjas pannvatten, matarvatten eller fjärrvärmevatten. Materialet i roststavar kan vara gjutjärn eller stål med varierande legeringshalt.

En vibrationsrost eller fast snedrost är ofta uppbyggd av en panelvägg med lufthål i fennorna mellan tuberna eller fritt liggande tuber med luftspalter mellan tuberna. Vattnet i tuberna ingår ofta i pannans cirkulationssystem. Rosten täcks ibland med ett skyddade slitskikt.

Eldstadsväggarna närmast rosten är vanligen skyddade med murverk. För att minska risken för påslag av aska är denna del ibland luftkyld.

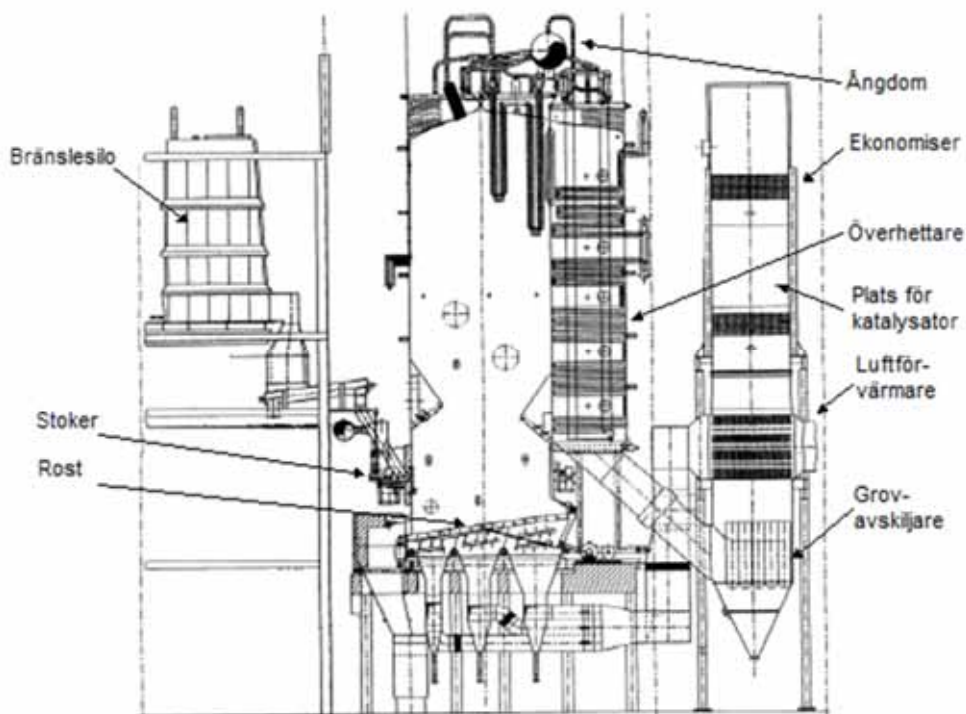
Vanliga skador på rostsystem som kan medföra omfattande ombyggnader är korrosionsskador på stativet för rosten, korrosionsskador i primärluftkanaler under rosten, erosionsskador i bränsleinmatning, skador på murverk, erosionsskador eller

skador orsakade av överhettning på roststavar, korrosions- och erosionskador i askutmatare och utmatare för rostgenomfall. En del roststavar i den högst belastade delen av rosten byts i vissa anläggningar minst en gång varje år.

Vid lågt syreöverskott och ojämn bränslekvalitet kan stråk med hög CO-halt uppkomma. En låg CO-halt kan ge korrosionsskador på oskyddade eldstadsväggar då bildad magnetit reduceras till järnoxid som sedan kan angripas av korrosiva gaser, t.ex. klor.

I en del rostpannor eldas bränslen där bland annat svaveloxider och framför allt klorväte bildas, till exempel vid förbränning av avfall. Stålytor som är utsatta för hög temperatur, i huvudsak överhettare och upphängningsdetaljer med materialtemperaturer över ca 320°C, kan då erhålla svåra korrosionsskador. Gaser som innehåller saltsyra ger även svåra korrosionsskador på ytor med en temperatur under ca 100°C. Skadornas omfattning beror förutom på bränslets sammansättning och materialtemperatur även på pannans utformning. Skador på pannväggar och överhettare beskrivs mer i detalj i avsnitten 2.1.4.2 respektive 2.1.5.2.

I Figur 2.1-2 visas en ångpanna med vibrationsrost. Bränsle, i huvudsak flis, bark och spån, tillförs pannan med en stoker placerad i pannfronten. Med stokern kastas bränslet in på rosten och fördelas över rostytan som består av en rörlig svagt lutande, vattenkyld panelyta med hål för primärluft i fenorna mellan tuberna. Tyngre partiklar med lång brinntid kastas längst in på rosten och transporteras med korta intermittenta rörelser tillbaka mot slaggschaktet vid pannfronten. Ekonomisern är uppdelad i två delar som möjliggör en framtida installation av katalysator. Den termiska effekten är ca 80 MW och ångdata är 100 ton/h, 100 bar samt 540°C.



Figur 2.1-2. Panna med vibrationsrost

Figure 2.1-2. Boiler with vibrating grate

### Fluidiserad bädd

I pannor med fluidiserande förbränning förbränns bränslet i fin sand, dolomit eller annat inert material som fluidiseras. Förbränningsluft tillförs genom ett stort antal dysor i eldstadens botten. Pannan utformas så att hastigheten i eldstaden blir så hög att bränsle och bäddmaterial fluidiseras.

I pannor med bubblande bädd, FB (Fluidized Bed), FBC (Fluidized Bed Combustion) eller BFB (Bubbling Fluidized Bed), är lufthastigheten anpassad så att bränsle och bäddmaterial expanderar till en bestämd nivå. Endast de finaste partiklarna lämnar bädden och avskiljs i stoftavskiljare efter pannan.

I pannor med cirkulerande bädd, CFB (Circulating Fluidized Bed), är hastigheten så hög att bränsle och bäddmaterial följer med luftströmmen och lämnar eldstaden. De större partiklarna avskiljs sedan från rökgaserna i en eller flera cykloner och återförs via sandlås till eldstadens underdel. Cyklonerna kan vara placerade utanför eldstaden eller inbyggda i eldstaden. Cyklonernas väggar kan vara kyllda och är då byggda av panelväggar eller okyllda med murade väggar. De finaste partiklarna följer med rökgaserna och avskiljs i en stoftavskiljare efter pannan.

Det finns även pannor med trycksatt fluidiserad bädd, PFBC (Pressurized Fluidized Bed Combustion). I dessa pannor är pannan innesluten i ett tryckkärl som trycksätts till ca 12 bar med hjälp av en gasturbin. Pannans volym blir därmed avsevärt mindre än en konventionell panna med samma kapacitet.

Större och tyngre partiklar, till exempel obrännbara delar från bränslet och mindre klum-par av sintrat material sjunker till botten av bädden och matas ut som bottenaska tillsammans med bäddmaterial genom öppningar mellan dysorna i pannans botten. I vissa anläggningar återvinns sedan den finare fraktionen av utmatat bäddmaterial.

Temperaturen på blandningen av bränsle och bäddmaterial är normalt relativt konstant och ligger mellan 800 och 900°C. I pannor med bubblande bädd sker en del av förbränningen ovanför bädden med en ökad temperatur som följd. Vid lätta bränslefraktioner som följer med gasströmmen kan en ökande temperatur i eldstaden även erhållas i CFB-pannor.

Det återcirkulerade materialet från cyklonen i CFB-pannor håller nästan samma temperatur som i eldstaden och kyla i några pannor med pannvatten eller ånga. Värmeöverföringen genom tubväggar med het sand på en sida blir mycket effektiv och stor effekt kan överföras med små värmeöverförande ytor.

FB och CFB-pannor är mycket bränsleflexibla och ett stort antal fasta bränslen med stor variation i fukthalt till exempel kol, flis, torv, spån, pellets och avfall kan utnyttjas. I anläggningar av PFBC-typ används för närvarande i huvudsak endast olika koltyper. Även olja som eldas i brännare kan användas. Pannorna byggs dock för ett visst bränsle och kan behöva anpassas för bränslen som avviker mycket från utlägsbränslet.

Styckestorleken på fasta bränslen beror på typ av bränsle och understiger ca 50 mm. Pannorna klarar endast begränsade mängder av obrännbara delar i bränslet. Dessa kan fastna i botten och störa fluidiseringen. Avfall måste till exempel förbehandlas genom utsortering av huvuddelen av metaller och andra obrännbara delar och därefter sönderdelas. Bränslen som innehåller aska med låg smältpunkt medför ökad risk för sintring av bäddmaterial.

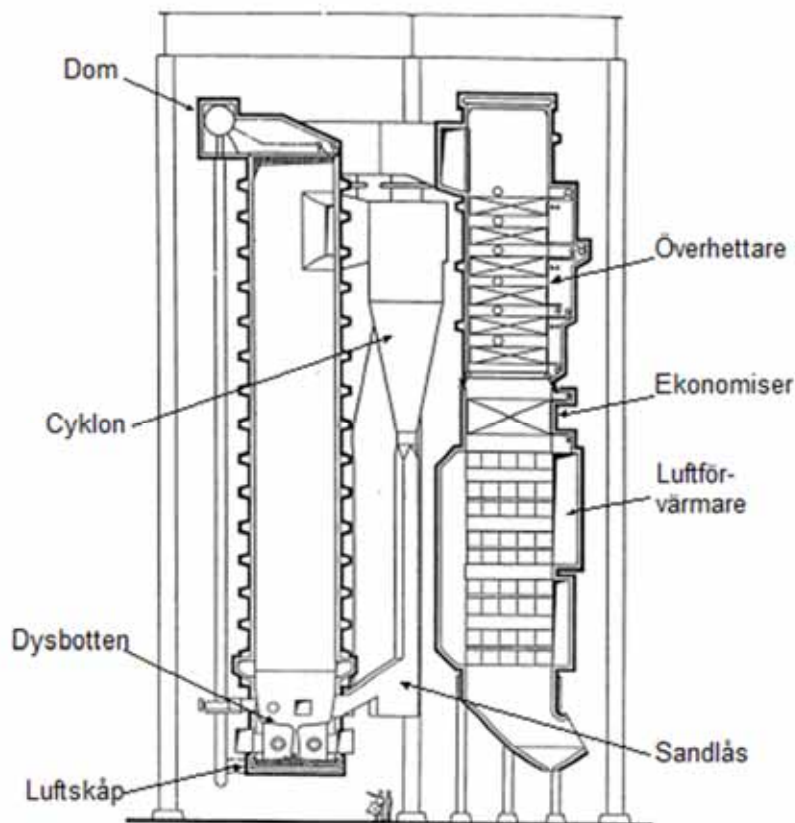
Vid start värms pannorna med oljebrännare tills temperaturen är så hög att de fasta bränslena kan antändas. Bränslemängden i pannor med fluidiserande förbränning är betydligt mindre än i pannor med rost.

I bubblande bäddar tillsätts bränslet vanligen ovanför bäddytan och i cirkulerande bäddar i eldstadens undre del strax över eldstadens botten.

Primärluft tillsätts genom eldstadens bottendysor. Sekundär- och eventuell tertiärluft blåses in högre upp i eldstaden.

Nedre delen av eldstaden skyddas med murverk medan övriga delar av eldstaden oftast utgörs av vattenkylda panelväggar.

I Figur 2.1-3 visas en CFB-panna för flis, spån, torv och kol med en termisk effekt på 165 MW. Pannans ångdata är 255 t/h, 150 bar och 540°C. Pannan har fyra vattenkylda cykloner placerade utanför eldstadsväggarna.



**Figur 2.1-3. Panna med CFB- förbränning**

**Figure 2.1-3. Boiler with CFB- combustion**

Erosionsskador orsakade av sand är vanliga. Skador förekommer bland annat om utskjutande delar eller dimensionsförändringar finns i sandflödet vilka kan initiera virvlar, till exempel vid övergång mellan murverk och oskyddade tubbytor samt svetsfogar som inte slipats plana. Omlänkning av gaser med sand till exempel vid eldstadstaket kan även ge upphov till erosionsskador. Även överhettare i eldstaden är utsatta för erosion. Murverk i bland annat cyklonerna utsätts för slitage liksom

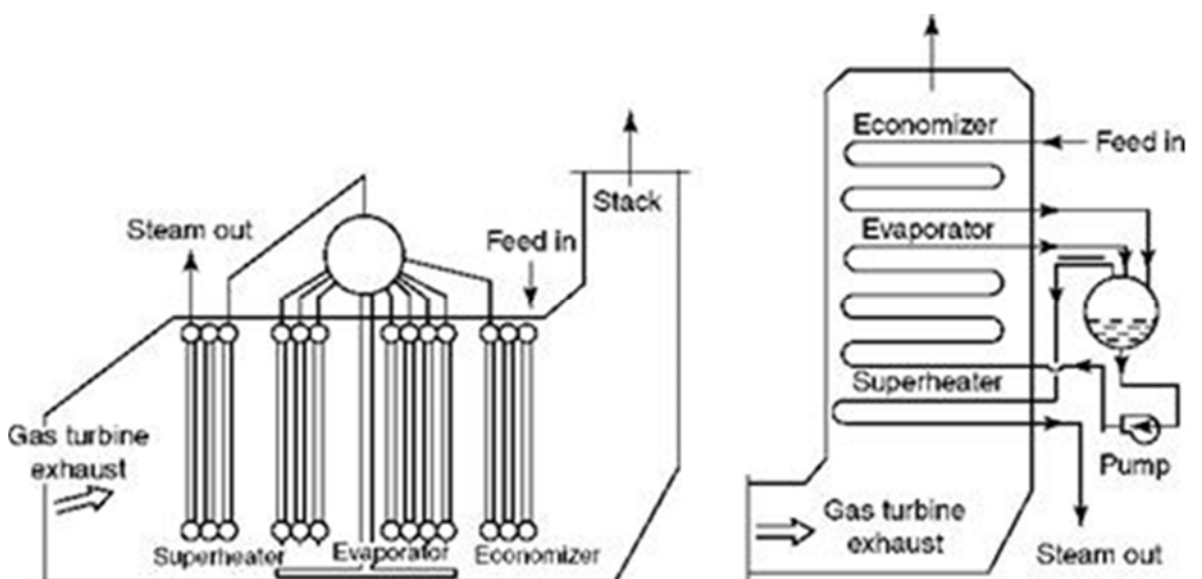
cyklonernas centralrör och tuber som är placerade i bäddmaterial. Dysorna i pannbotten slits och måste bytas regelbundet.

### Avgaspanna

Energi kan utvinnas från de heta avgaser som strömmar ut från en gasturbin genom att de får hettas upp och förångas vatten i en avgaspanna. Ångan överhettas sedan i avgaspannan för att användas till att driva en ångturbin. Avgaserna från gasturbinen, med en temperatur på t.ex. 540°C, leds först in i kanal som består av ett plåthölje som kan expandera i längdled, t.ex. med hjälp av expansionsbälgar eller plåtar som ligger omlott. Tvärsnittsarean ökar succesivt, särskilt i höjddled. I kanalen finns en brännare som man vid behov kan elda upp rökastemperaturen upp till ca 1000°C.

Panna består av olika moduler med förångarytor, överhettare och ekonomisar. De heta rökgaserna passerar i regel först genom överhettarnas olika steg, som förses med ånga från ångdomen, så att ångan upphettas till utgående ångtemperatur, t.ex. 540°C. De efter överhettarna avsvälnade rökgaserna passerar sedan genom förångarytor vatten förångas och förser ångdomen med vatten/ångblandning. Därefter passerar rökgaserna ekonomisar där vatten förvärmer det inkommande vattnet till ångdomen och till sist passerar de en fjärrvärmeekonomiser som hettar upp utgående fjärrvärmevatten. Därefter leds rökgaserna, som nu har en temperatur under 100°C, ut genom en skorsten. Figur 2.1-4 visar en principen för hur en horisontell avgaspanna är konstruerad.

Typiskt för en avgaspanna är att de startas och stoppas frekvent och relativt snabbt. Detta kan leda till skador i pannan, inte mins i form av termisk och termomekanisk utmattning. Trots detta körsätt är det vanligt att avgaspannor dimensioneras för baslast-drift. Eftersom konstruktionen består av ett flertal komponenter, t.ex. ång- och vattenlådor, som är känsliga för cyklisk drift kan körsättet av en avgaspanna ha stor betydelse för livslängden. Mer läsning om risken för skador vid olika typer av cyklisk drift står att finna i Värmeforskrappport 1178, Förebyggande underhåll och livslängdsbedömning med avseende på cyklisk drift.



Figur 2.1-4. Principen för en avgaspanna

Figure 2.1-4. The principle of a heat recovery steam generator (HRSG)

### *Cirkulation*

Den energi som frigörs vid förbränningen tas upp genom tuber i pannans väggar och rökgasstråk och överförs till vatten eller ånga på insidan av tuberna. På detta sätt kyls tubmaterialet som får en temperatur strax över temperaturen på mediet i tuberna. Det är viktigt att samtliga tuber genomströmmas av det kylande mediet för att undvika överhettning av tubmaterialet.

Vatten pumpas från matarvattencisternen med matarvattenpumpar till pannan och ersätter det vatten som förångas i överhettarna och som avleds från pannan via bottenblåsningar och dylikt. Det inkommande matarvattnet värms till en temperatur nära mättnadstemperatur av rökgaser i en ekonomiser placerad i pannans bakre del. I pannor med ångdom förs det uppvärmda vattnet till ångdomen där vattennivån konstanthålls.

Vattnets och ångans transport genom pannans tuber åstadkoms med självcirkulation eller forcerad circulation.

Pannor med självcirkulation har alltid ångdom. Från domen sjunker vattnet som håller mättnadstemperatur genom fallrör, som vanligen dras utanför pannan, till samlingslådor i pannans undre del. Från samlingslådorna stiger sedan vatten uppåt genom vägguber och tubknippen och upphettas. En del av vattnet förångas och bildar ångblåsor som medför att densiteten på vatten- ångblandningen blir avsevärt lägre än densiteten på vattnet i fallrören. Blandningen av vatten och ånga stiger därmed uppåt och drar med sig vatten från samlingslådorna. Ånga och vatten separeras i domen. Vattnet sjunker åter ned i fallrören och ångan leds efter avskiljning av droppar vidare från domen för att överhettas. Densitetsskillnaden mellan ånga och vatten avtar med ökande tryck vilket medför att drivkraften minskar. Självcirkulation används därför endast för tryck under ca 140-160 bar.

Cirkulation kan även åstadkommas med pump, så kallad forcerad cirkulation. Forcerad cirkulation används vid tryck över tryckgränsen för självcirkulation. Vattnet kan då fördelas genom tuberna med strypningar i inloppet till varje tub. Om forcerad cirkulation används vid lägre tryck kan de värmeupptagande ytorna arrangeras på annat sätt än vid självcirkulation så att mer kompakta pannor erhålls. Tuberna kan även förläggas nästan horisontellt med endast liten lutning uppåt.

Forcerad cirkulation används i pannor med ångdom då vatten återcirkuleras på samma sätt som vid självcirkulation, till exempel La Mont pannor, och vid pannor utan ångdom, så kallade genomströmningspannor.

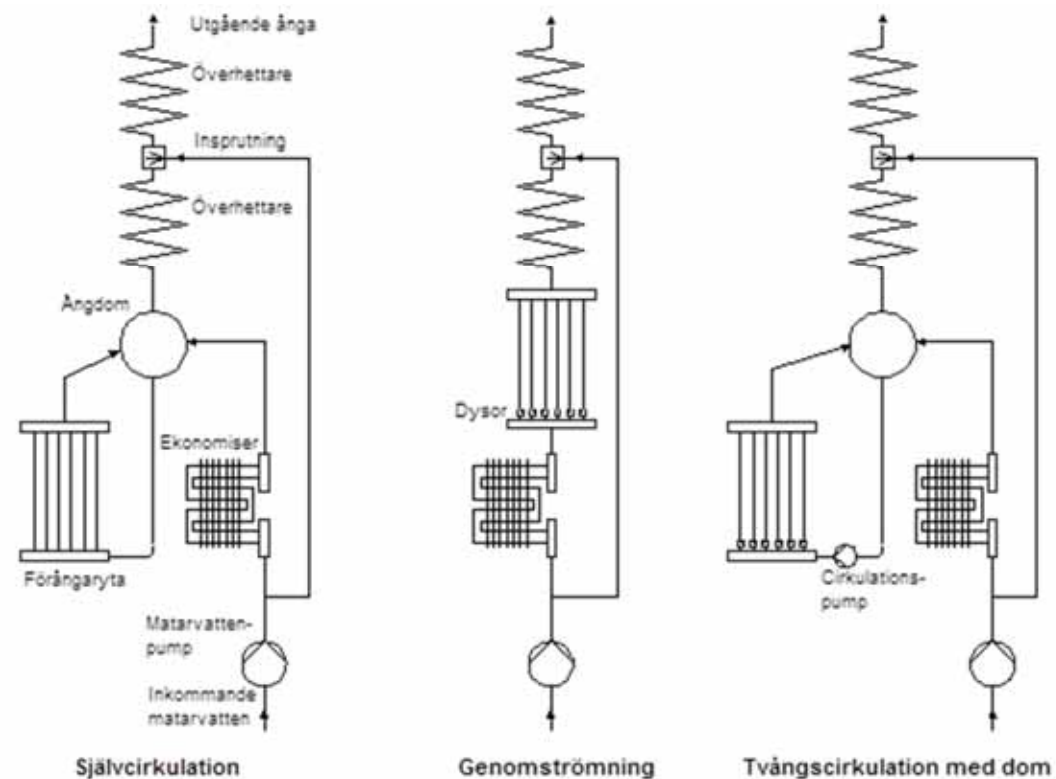
Pannor med forcerad cirkulation och dom är ovanliga i Sverige för kraftproduktion och används endast vid tryck under ca 65 bar. Dessa pannor är känsliga för igensättning av dysorna vilket kan medföra ett försämrat vattenflöde genom tuberna som kan orsaka överhettning av tubmaterialet.

I en genomströmningspanna leds matarvattnet utan avbrott genom ekonomiser, eldstadsväggarna och tubknippen. Vattnet förvärms, förångas och överhettas i en linje utan avbrott. Förångningspunkten varierar i pannan beroende på last. Dessa pannor klarar inte laster under ca 40 % utan att särskilda åtgärder vidtagits, till exempel inkoppling av vattenavskiljare.

Pannan i Figur 2.1-1 (sid 2.1-2) är en genomströmningspanna medan pannorna i Figur 2.1-2 (sid 2.1-4) och 2.1-3 (sid 2.1-6) har självcirkulation.



I Figur 2.1-5 nedan visas exempel på de olika cirkulationssystemen.



Figur 2.1-5. Cirkulationssystem  
Figure 2.1-5. Circulation system

### Värmeupptagning

I eldstaden överförs värmen genom tubväggarna i huvudsak genom strålning, i övriga delar i huvudsak genom konvektion.

Pannornas väggar kring eldstad och konvektionsdelar är normalt kyllda medan väggar kring de bakre panndelarna är täckta med plåt eller murverk. Öppningar för genomföringar och luckor samt ytor utsatta för hård värmebelastning eller svår erosion skyddas med stampmassa.

Kyllda väggar i pannor som tillverkats fr.o.m. mitten på 1960-talet är alla utförda med tätsvetsade panelväggar. Ett antal äldre pannor är utförda med löst hängande vägguber med murverk på utsidan och en tätsvetsad plåt utanför murverket, så kallad skin-casing. Skador på skin-casing kan medföra korrosion på utsidan av tuberna och stor belastning på grund av inträngande stoft mellan plåt och tuber. Det äldsta utförandet med enbart murverk utanför de kyllda tuberna förekommer inte idag.

Förutom medietrycket i rören utsätts pannornas väggar för en tryckskillnad mellan pannans insida och omgivningen. Större delen av pannorna arbetar med ett inre undertryck. Tryckdifferensen över pannväggarna tas upp genom att väggarna stöds mot balkar på pannans utsida.

Överhettarna kan vara placerade i eldstadens överkant (strålningsöverhettare) eller omedelbart efter eldstaden (konvektionsöverhettare) och byggas med horisontella eller

vertikala tubknippen i rökgasstråket. Överhettarytor kan även förekomma som skärmar och i pannväggar. I några CFB-pannor har överhettare även placerats i sandlås för återcirkulerat bäddmaterial från cyklonerna.

Överhettare med vertikala tubknippen är ofta utförda med U-tuber som inte kan dräneras. Sådana överhettare kan skadas vid start om dessa inte torkas eller blåses rena under startförloppet. Om kondensat ligger kvar i botten på några tuber kan ångflödet blockeras genom dessa med utebliven kylning och överhettning som följd.

Ångan överhettas vanligen i flera steg med kylning emellan. I de flesta anläggningarna sker kylningen genom att matarvatten sprutas in i ångan via insprutningsdysor. Detta sätt förutsätter att insprutningsvattnet håller en hög kvalitet då föroreningar i vattnet kan ge beläggningar på insidan av överhettartuber med överhettning av tubmaterialet som följd. Föroreningar i vattnet kan även ge skador på turbinskovlar.

Lägre krav kan ställas på matarvattnet om ångan kylv på annat sätt. I några anläggningar kylv ångan med värmeväxlare där matarvatten till domen eller pannvatten används som kylmedium. I andra anläggningar används i stället kondensat som insprutningsvatten. Kondensatet produceras genom att mättad ånga från domen kylv med matarvatten i en kondensor.

Överhettarnas inbördes placering i rökgasstråket varierar mellan olika pannor i huvudsak beroende bränsleslag. Vanligen placeras tuberna med den högsta ångtemperaturen närmast eldstaden. I fastbränsleeldade pannor med askor med låg smältpunkt eller korrosiva gaser kan dessa tuber placeras längre bak i rökgasstråket för att undvika igensättning eller skador.

I de större anläggningarna återförs ånga från turbinens högtrycksdel till pannan för återuppvärmning i mellanöverhettare i ett eller flera steg. Ångan genom mellanöverhettarna håller avsevärt lägre tryck än huvudångan. Ångan upphettas till ungefär samma temperatur som utgående högtrycksånga.

De olika pannedelarna beskrivs i avsnitten 2.1.2 till 2.1.10 i detta kapitel.

#### *Sotningssystem*

Beläggningar på panntuber, överhettare, förångningsytor, ekonomiserytor och luftförvärmare tas bort med olika sotapparater. För ytorna närmast eldstaden som kan beläggas med kladdande stoft används ång- eller luftsotningsapparater. I framförallt avfallseldade pannor förekommer även slagsotning. För ytor i de bakre delarna av pannan används även kulsotning och ljudsotning.

Ång- och luftsotningsutrustning kan ge erosionsskador på tuber som träffas direkt av ångan eller luften med tubläckor som följd. Medföljande kondensat i ånga som inte överhettats kan även skada tuberna. Materialet kan utsättas för termisk utmattnings med sprickbildning då materialet hastigt kylv och därefter åter värms. Tuber som träffas av kulor av hårda material kan ge erosionsskador. Slagsotning kan ge upphov till sprickor vid infästningspunkten mellan tuber och lådor. Vid ljudsotning förekommer sprickbildning i framförallt anslutande delar till sotningsapparaten.

Sotblåsare som arbetar i hetare delar av pannan dras normalt ut från pannväggen vid stillestånd men kan trots detta skadas genom termiska belastningar. Fuktig ånga till sotblåsarna kan ge erosionsskador på såväl sotningsutrustningen som kringliggande tuber. Fukt kan även ge igensättning av tuber. I pannans bakre drag kan korrosion förekomma på sotlansarna.



Skador på och kontroll av tuber som renas av olika sotningsutrustningar beskrivs i avsnitten nedan.

### *Upphängningssystem*

Vikten av eldstad och konvektionsytor tas vanligen upp av balkar ovanför pannan. De pelare som bär upp stödbalkarna ligger utanför pannans isolering och byggs ibland ihop med stödbalkar för pannhusets väggar. Pannor med upphängning uppifrån växer vid uppvärmning nedåt. Vissa panndelar till exempel ekonomiser, rost och utmatare för bottenaska stöds normalt underifrån. Alla skarvar mellan dessa panndelar och pannan i övrigt måste därmed utföras med expansionsskarvar.

Vissa pannkonstruktioner är utformade så att de kan stödas underifrån. Ångdomen stöds då i vissa konstruktioner med grova falltuber och i andra med konvektionstuber mot en underliggande vattenlåda. All värmeexpansion sker därmed uppåt.

Hänsyn måste tas till pannans termiska rörelser då rör, balkonger, kablar med mera ansluts till delar som är monterade på pannan.

De delar av stödkonstruktionen som är samisolerade med pannan kan vid ett eventuellt läckage utsättas för korrosiva gaser och bör kontrolleras vid större revisioner.

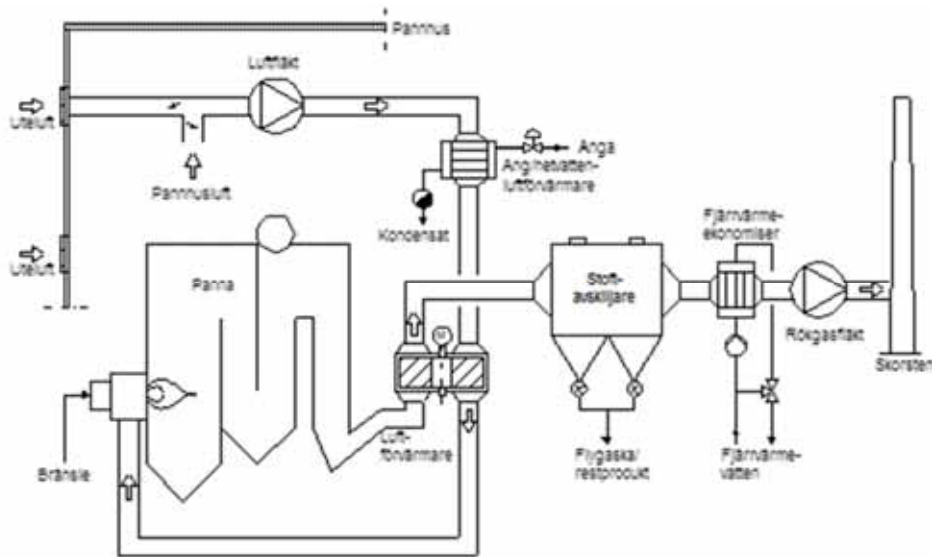
### *Värmeytor utanför pannan*

Förbränningsluft tillförs flammen i pannans eldstad i flera punkter som primärluft, sekundärluft och eventuellt som tertiärluft och/eller överluft med en eller flera luftfläktar. Fläktarna kan vara av axial- eller radialtyp. Fläktar för högre tryck är ofta kopplade i serie med en totalluftfläkt.

Intagsluften förvärms vanligen genom inblandning av luft från pannhustaket som värmts på grund av värmeförluster från panna och hjälputrustning. I avfallsanläggningar tas en stor del av luften från bränslemottagningen för att minska lukt till omgivningen. Därefter förvärms vanligen luften ytterligare innan den tillförs pannan. Förvärmningen sker ofta i två steg, en första uppvärmning med ånga eller hetvatten och en andra genom värmeväxling med rökgaser.

Rökgastemperaturen efter ekonomisern eller luftförvärmaren sänks ytterligare i vissa anläggningar i en fjärrvärmekyld ekonomiser som placeras efter stoftavskiljare

I Figur 2.1-6 nedan visas placering av yttre värmeytor.



**Figur 2.1-6. Yttre värmeytor**

**Figure 2.1-6. Heat surfaces outside the boiler**

Förvärmarna i luft och rökssystemen beskrivs i avsnitt 2.1.7 och 2.1.8.

#### *Åtgärder för reduktion av kväveoxider*

Nya anläggningar byggs alltid för låg emission av kväveoxider och flertalet av äldre anläggningar har kompletterats med utrustning för att sänka halten. Kväveoxider reduceras med primära eller sekundära åtgärder. Dessa metoder kombineras ofta.

Vid primära åtgärder undertrycks bildningen av kväveoxider. Detta åstadkoms återcirkulation av rökgas, minskning av luftöverskott, sänkning av förbränningstemperatur, förbättrad omblandning av förbränningsluft, stegvis förbränning med mera.

Vid brännare kan rökgas återcirkuleras i flammen genom lämplig utformning av brännarna. Vid annan förbränning återcirkuleras rökgas med en fläkt från rökssystemet.

Med sekundära åtgärder reduceras redan producerade kväveoxider. Kväveoxider omvandlas till kvävgas och vatten. De vanligaste metoderna är SNCR (selective non catalytic reduction) där en absorbent sprutas in vid lämplig temperaturnivå och SCR (selective catalytic reduction) där avskiljningen sker med en katalysator.

Vid SNCR- reduktion används ammoniak eller UREA som absorbent. Absorbenten injiceras i vattenlösning i pannan där temperaturen är ca 850-950°C, dvs. ofta i eldstadens övre del. Utrymmet i detta temperaturområde måste vara så stort att tid för inblandning och reaktioner finns. Ett visst utsläpp av ammoniak förekommer.

Vid SCR- reduktion placeras katalysatorerna vid en rökastemperatur på ca 400- 500°C, dvs. ofta i närheten av ekonomisern. Ammoniak tillsätts före katalysatorytorna. Även här förekommer utsläpp av ammoniak, dock i mindre mängd än vid SNCR-reduktion vid samma reduktionsgrad.

Metoderna kan även kombineras. Katalystorn används då för att minska utsläppet av ammoniak från en SNCR- anläggning, så kallad slip-katalysator.

Primära åtgärder kan ge upphov till CO i eldstaden som kan medföra korrosionsskador på tubväggarna. Vid rökgasrecirkulation är det viktigt att kanaler med återcirkulerande rökgaser hålls varma så att kondensation av vattenånga eller sura komponenter undviks. Korrosionsskador i dessa kanaler är inte ovanliga. Recirkulationskanaler okulärbesiktigas.

Vid sekundära åtgärder förekommer korrosionsskador på värmeöverförande ytor i pannans bakre del på grund av att oreagerad ammoniak fastnat i stoft på dessa. Skadade dysor kan ge droppar som medför att tuber i eldstaden skadas.

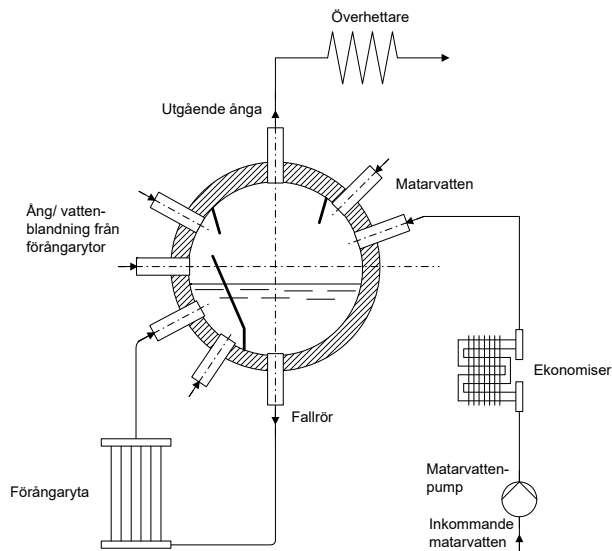
Skador på eldstadsväggar beskrivs i avsnitt **2.1.4** nedan.

### 2.1.2 Ångdomar

#### *Konstruktion*

Pannor kan indelas i dompannor och genomströmningspannor. I Sverige är de allra flesta av den första typen. I pannor med dom cirkuleras en stor mängd vatten med mättnadstemperatur från domen, genom de värmeupptagande tuberna och tillbaka till domen. En del av vattnet i tuberna förångas. I domen separeras ångan från vattnet. Ångan leds genom diverse anordningar för avskiljning av medryckande droppar ut från domen till överhettarna. Det i panntuberna uppåtströmmande vattnet ersätts med vatten från domen genom fallrör. Vattennivån i domen hålls konstant genom att den vattenmängd som förångats ersätts med matarvatten som tillförs domen via en ekonomiser. För utgående ånga förbinds tuber direkt till ångdomen upptill eller till en samlingslåda vilken ansluts till ångdomen med ett fåtal grövre rör.

Figur 2.1-7 visar principen för vatten- och ångflöden. Ångdomen är i drift fylld med ca hälften vatten och hälften mättad ånga. För att droppavskiljningen från ångan ska bli god är domen invändigt försedd med exempelvis skärmanordningar. Vissa pannkonstruktioner är försedda med två ångdomar där ångan från en nedre dom leds upp till en övre där ytterligare droppavskiljning sker.



**Figur 2.1-7. Exempel på vatten och ångflöden till och från en ångdom.**

**Figure 2.1-7. Examples of water and steam flows to and from a steam drum.**

Ångdomen är det största tryckkärlet i pannan och den belastas med ett högt tryck. Trycket är något högre än det från pannan utgående ångtrycket och genom den stora volymen blir också väggjocklekarna stora. Relativt sett kan dock storleken på domen variera en hel del eftersom det finns pannor i vitt skilda storlekar. En ångdom i medelstorlek kan vara ca 15 meter lång, 1,5 meter i diameter och ha en väggjocklek på 60 mm. Ångdomar är försedda med manluckor och tillverkas ofta av valsade plåtar som bockas och svetsas.

Den typiska drifttemperaturen är ca 300°C vilket innebär att krypning inte är dimensionerande. Det är vanligt, inte minst i äldre ångdomar, att konstruktionen utnyttjar maximala tillåtna spänningar. Normalt tas det inte hänsyn till utmattning vid dimensioneringen vilket det heller inte finns några krav på. En ångdom är därför i princip dimensionerad för en obegränsad livslängd men ofta talar man om livslängder i storleksordningen 40 år.

### *Material*

Till ångdomar används kolstål, kol-manganstål och höghållfasta stål. I syfte att reducera vikten är höghållfasta stål vanliga. Sådana stål uppvisar i regel reducerad duktilitet. Det kan medföra ökad känslighet för sprickbildning, minskad skadetålighet och ökad känslighet vid svetsning. Ett klassiskt exempel är det höghållfasta så kallade Fortiweldstålet som hade stor användning under 1960-talet och som har varit förknippat med frekventa problem. Stålet är legerat med bor vilket gör att det får hög hållfasthet men samtidigt låg duktilitet och hög sprickbenägenhet, inte minst i svetsar. Ett flertal olika höghållfasta stål förekommer, exempel ges i Tabell 1 i Värmeforskrappport 587. Utöver typ av material spelar även tillverkningen stor roll för ångdomens hållfasthetsegenskaper. Större kallbearbetning vid plåtvalsningen resulterar i högre sträckgräns och lägre duktilitet. En stor roll spelar även hur tuber och rör sitter infästa vid genomföringar i domen.

#### *2.1.2.1 Skador i ångdomar*

Ångdomar har ett högt energiinnehåll och ett plötsligt haveri skulle få katastrofala konsekvenser. Läckage förekommer men plötsliga haverier i drift har mycket sällan inträffat i modern tid. Sprickor är dock vanligt förekommande. I en finsk kartläggning hittades sprickor i över 40 % av 250 inspekterade ångdomar (Tabell 1 i Värmeforskrappport 587). Sprickorna var återkommande i 56 och svetsreparationer utfördes i 43 av dessa. De material som presenteras i sammanställningen; kolstål, två olika kolmanganstål och sju olika höghållfasta stål, visar alla skador. Skadefrekvenserna är mellan 17 och 100 % och i de allra flesta fall över 30 % för de olika materialen. De högsta frekvenserna av sprickor står att finna bland ångdomar som är tillverkade av höghållfasta material, material med låg duktilitet och sådana som inte är överdimensionerade.

#### *Töjningsinducerad korrosionssprickning (SICC)*

I Värmeforskrappport 1178 beskrivs flera fall av sprickbildning i ångdomar där det konstateras att:

- Sprickor är vanligast vid genomföringar pga. att det är där spänningarna är högst.
- Den dominerande skademekanismen vid genomföringar är miljöinducerad sprickbildning i form av töjningsinducerad korrosionssprickning (SICC).
- Spricktillväxthastigheten korrelerar med spänningsintensiteten, vilken i sin tur påverkas av design och materialval. Generellt utnyttjas hållfastheten i ett material, vilket medför högre spänningar ju högre materialets hållfasthet. För en given geometri innebär det högre spänningsintensitet, vilket förklarar varför höghållfasta stål är relativt sprickkänsliga, se vidare i avsnitt 1.5.4.3.

Det är vanligt att skador i ångdomar åtgärdas, ofta genom bortslipning, utan att närmare undersöka skademekanismerna. Utöver SICC uppträder flera kända skademekanismer.

#### *Korrosionsutmattning och spänningskorrosion*

Vanliga skador är invändiga sprickor kring tubgenomföringar och i ligamenten mellan dessa. Utöver SICC kan miljöinducerad sprickbildning i form av korrosionsutmattning och spänningskorrosion ge upphov till sådana sprickor. Dragrestspänningar kan föreligga som en följd av inpressningen av tuber till domen. Det är ett exempel på goda

förutsättningar för alkalisk spänningskorrosion. Skadorna uppkommer då företrädesvis i spalter mellan tub och genomföring.

En ökad koncentration av salter från pannvattnet kan ge höga pH-värden vilket kan orsaka alkalisk spänningskorrosion. Hög fri syrehalt har störst betydelse för den korrosiva delen hos samtliga former av miljöinducerad sprickbildning. Vattnet i ångdomar är förknippade med mycket låga fria syrehalter men vid stopp, då trycket tas ned, kommer det i regel in luft i systemet som syresätter vattnet tillräckligt för att aktivera miljöinducerad sprickbildning.

#### *Termisk, termomekanisk och mekanisk utmattnings*

Termisk utmattnings inträffar under förutsättning att ångdomen utsätts för tillräckligt stora temperaturvariationer och -transienter. Drift av ångdomar är inte förknippade med dramatiska temperaturvariationer men termisk utmattnings är ändå förekommande, särskilt om faktorer som ökar sprickbenägenheten bidrar. Övergångar mellan tjocka och tunna vägg tjocklekar är en välkänd sådan faktor. Andra faktorer är ångdomar med geometrier som ger höga spänningskoncentrationer och tillverknings sätt, till exempel vid och inpressning av tuber, som ger egenspanningar. Betydande svetssegenspanningar kan kvarstå även då svetsarna är avspänningsglödade.

Termisk utmattnings orsakas oftast av svårigheter att få uppblandning av inkommande matarvatten från ekonomisar, som är kallare än pannvattnet i domen. Det kallare vattnet faller ner mot botten på domen och förorsakar där temperaturväxlingar som medför sprickbildning. Ångdomar kan även vara utsatta för relativt stora och frekventa lastväxlingar i drift vilket kan bidra till eller rent av vara den huvudsakliga orsaken till sprickbildning (Fuhlrott 1984). Lika så skulle frekventa starter- och stopp kunna bidra till utmattnings. Olika typer av utmattnings beskrivs närmare i avsnitt 1.5.1.

Termiska utmattnings sprickor påträffas särskilt vid områden där temperaturgradienter har kraftig inverkan och där spänningskoncentrationer råder som till exempel på:

- i) kanterna av tubhål på mantelns insida,
- ii) utsidan av tubinfästningar, sprickorna initieras ofta i svetsar,
- iii) manluckor, främst i svetsar till gångjärn och
- iv) på insidan vid gränsområden mellan mantelytor med och utan tubhål samt
- v) ångdomens ändar.

Frekvent tryckväxling kan till exempel ge sprickor i påsvetsade stöd och sprickor i tubinfästningar förekommer på grund av externa växlande böjpåkänningar på tuberna, till exempel från sotblåsare.

Sprickor har även observerats propagera från områden med spänningskoncentrationer. Ett exempel är axiella invändiga sprickor längs hela ligamenten mellan tubhål. Den tangentiella spänningen från det inre övertrycket har då styrt propageringen.

Risken för termisk och termomekanisk utmattnings kan minskas i den mån snabba växlingar i temperatur och tryck vid samt frekvens av starter och stopp, samt temperatur- och tryckväxlingar i drift, kan undvikas.

#### *Korrosion*

Frätgropar (pitting) påträffas ofta invändigt i domar och utgör initieringspunkter till sprickor. Inte minst korrosionsutmattnings sprickor får grogrund i frätgropar.

Frätgropar i tubändar, nära genomföringar till domen, är ett inte ovanligt problem där korrosionen i sig kan fortgå till läckage om det inte upptäcks och åtgärdas i tid. Frätgropar är vanligast i domar till värmepannor som är förknippade med relativt låga drifttryck och en inte så sträng kontroll vad gäller syrehalt i vattnet.

Allmänkorrosion kan förekomma i botten av domen. Korrosionsprodukterna kan sedan föras vidare och störa pannans olika delar.

Fysiska förutsättningar som fukthalt, temperatur och tryck har stor betydelse för korrosion. Korrosionsrelaterade problem förekommer därför även i rena pannvatten med god övervakning. Generellt har dock domar med lägre eller ojämn vattenkvalitet högre skadefrekvenser.

Utvändiga korrosionsangrepp kan förekomma om ångdomen står i en miljö som blir korrosiv, till exempel genom att kemikalierika beläggningar samverkar med fukt från sotblåsare. Sådan korrosion kan bli kritisk främst om tubanslutningar angrips.

#### *Återvärmningssprickor*

Återvärmningssprickor uppstår vanligtvis i svetsars värmepåverkade zoner under avspänningsglödning. Höghållfasta stål kan vara känsliga, särskilt sådana som är vanadinlegerade. Närmare beskrivning av denna typ av spricka finns i **avsnitt 1.5.2**. Det förekommer att återvärmningssprickor förblir oupptäckta efter tillverkningskontrollen och även att de uppstår i drift, särskilt om avspänningsglödning inte utförts eller om betydande svetsegenspänningar kvarstår efter en sådan. Det typiska är då att sprickorna uppstår efter relativt korta drifttider

Utöver de ovan nämnda skadetyperna kan det även nämnas att läckage har uppstått i ångdomar på grund av dålig inpressning av tuber. Detta gäller konstruktioner som inte har haft tätsvetsade tubinfästningar.

#### *Försprödning*

Försprödning kan förekomma i ångdomar av höghållfasta material efter långa drifttider om temperaturen varit omkring 300°C eller däröver, se vidare **avsnitt 1.5.6** och Värmeforskrappport 579 (Gladh 1996). Innehåll av koppar i stålet har visats ge stora försprödningseffekter i ångdomar (Hernas 1997). Inlöst koppar skiljs ut som små partiklar vid förhöjd temperatur. Det ger en utskiljningshårdande men samtidigt försprödande effekt. Signifikant försprödning erhålls efter längre drifttider vid typiska drifttemperaturer för ångdomar (ca 300°C).

##### *2.1.2.2 Provning av ångdomar*

Sprickor i ångdomar kan uppstå både på in- och utsidan. Eftersom ångdomar är försedda med manluckor kan de provas från insidan. Detta är i de allra flesta fall att föredra för sökning av de typer av sprickor och andra skador som kan uppträda där. Alternativ och Ett komplement kan vara ultraljudprovning (UT) från utsidan för att upptäcka eller storleksbestämma insidiga sprickor. Möjligheterna till sådan provning begränsas dock ofta av tätsittande av tuber.

Provning av ångdomar inleds med visuell inspektion för att bedöma det generella tillståndet av inre ytor, särskilt vid svetsar och anslutningar. De yttre formerna och att stöd, anslutande rör samt tuber sitter intakt, kontrolleras.

Spricksökning sker i första hand med magnetpulver provning (MT). Våt fluorescerande MT rekommenderas för att säkrast kunna hitta de olika typer av sprickor som förekommer i ångdomar. Omsorgsfull ytpreparering före provningen är av avgörande betydelse. Rekommendationer för ett riktigt genomförande av MT ges i **avsnitt 1.6.1**.

Om fel påträffas kan det i vissa fall vara möjligt att utföra UT från insidan för att bestämma omfattning och storlek av felen. Val av metodik beror på felens utseende, belägenhet och vilka typer av defekter eller sprickor som det kan befaras att det rör sig om, se vidare **avsnitt 1.6.3**. För ligamentsprickor förekommer det att omfattande finmaskiga nät av sprickor döljer sig djupt in i godset då begränsade ytliga fel indikeras. Sprickan kan i vissa fall initieras en bit in i godset vilket betyder att det kan gå flera år innan den syns på ytan.

Det är viktigt att kunna fastställa vad som orsakat skadan då ångdomens framtid ska avgöras. Ett nödvändigt led i detta är att undersöka skadan metallografiskt vilket bäst sker genom att ta ut ett materialprov från det indikerade området, se **avsnitt 1.7.1**. Ett alternativ kan vara att utföra replikprovning, se **avsnitt 1.6.6**. Detta kan ge tillräcklig information men metoden kan också ha avgörande begränsningar i jämförelse med materialprover. Replikprover kan även vara ett komplement till materialprover, till exempel om flera områden bör undersökas.

Vid analys av skador och återstående livslängd hos ångdomar kan det i vissa fall vara angeläget att ha relevanta dragprov-, slagseghet- eller brottseghetsdata, till exempel för svetsar. Tillförlitliga data för den aktuella ångdomen kan saknas. Materialet kan även förspådas med tiden vid de aktuella drifttemperaturerna. Det kan alltså finnas skäl till att utföra förstörande provning. Materialuttag från ångdomen för sådan provning får då utföras, se **avsnitt 1.7.1**, vilket sannolikt medför att den måste svetsrepareras efteråt. Detta görs enklast genom att skära ut ett cirkulärt prov av lämplig storlek och sedan svetsa dit en blindstuts.

I övrigt är det viktigt att ha historiken för pannvattenkemin kartlagd samt aktuella vattenanalyser.

#### 2.1.2.3 Återstående livslängd hos ångdomar

Precisionen och omfattningen i underlag för drift- och skadehistorik, konstruktion, materialval, ritningsunderlag, tillverkningskontroll och tidigare inspektioner ger en uppfattning om vilka möjligheter det finns och vilka insatser som kan behövas för att göra bedömningar av den återstående livslängden. Vid granskning av underlagen med avseende på de faktorer som kan begränsa livslängden identifieras de områden där skador kan befaras ha uppstått eller kunna uppstå. Generellt rekommenderas en spänningsanalys som följs av en skadetålighetsanalys, se **avsnitt 1.8**. Resultaten av en sådan visar:

- Spänningsfördelning, dvs. var provning i första hand bör utföras.
- Acceptabla sprickstorlekar, vilket avgör vilka detekteringsgränser som krävs för provningen.

Som beskrivits ovan finns det för ångdomar flera livslängdsreducerande faktorer och de kan samverka med varandra. Följande punkter sammanfattar sådana faktorer:

- Ogynnsam konstruktion med avseende på spänningskoncentrationer.
- Hög utnyttjandegrad av hållfastheten.
- Driftstörningar och förändrade driftparametrar.



- Material
- Tillverkning (svetsning och invalsnings).
- Vattenkemi
- Vatten- och ångmiljö (fukthalt, tryck och temperatur)
- Försprödning (Cu-legerade material)
- Frekvens och storlek av termiska cykler och spänningscykler.
- Yttre påkänningar.

För att bestämma tillståndet behövs provning. För ångdomar gäller det i första hand att detektera eventuella sprickor, vilket kan utföras med vägledning av avsnittet ovan. Det är viktigt att klargöra och dokumentera detekteringsgränser samt till vilken grad provningen är avpassad för de olika typer av sprickor och defekter som kan förekomma. Det är också viktigt att klargöra om det kan finnas skador som provningen inte kan upptäcka. Genom en spännings- och skadetålighetsanalys kan detekteringsgränser, provpositioner och provmetoder bestämmas på ett säkert sätt.

Om sprickor påträffas är det praxis att de slipas bort. Det skall verifieras att alla skador är borta med OFP. Innan bortslipning rekommenderas att ett båtprov som innehåller en sprickspets tas ut, se **avsnitt 1.7.3**, för metallografisk undersökning i syfte att fastställa skademekanism. Ett motsvarande replikprov är ett alternativ men ger inte alltid tillfredställande information. Sprickor är vanligast förekommande vid genomföringar där skadetåligheten samtidigt är lägst. Efter bortslipning måste det bestämmas om fortsatt drift kan tillåtas med nedslipningarna. Genom att uppdatera spännings- och skadetålighetsanalysen med den nya geometrin kan detta avgöras. Om fortsatt drift inte kan tillåtas är det möjligt att utföra en reparation. Lokal ifyllnad av slipningar genom svetsning är olämpligt. Det beror på att det är vanligt att nya sprickor uppstår inom kort på grund av de svetsegenspänningar som har introducerats. Följande reparationsmetoder har visats vara framgångsrika i fall av sprickor vid genomföringar:

- Skär ut en sektion av manteln med genomföringar som har haft sprickor och svetsa in en ny prefabricerad del med genomföringar. Utför avspänningsglödning med mattor.
- Öka diametern på genomföringen så att områden som har haft sprickor försvinner och svetsa dit en ny stuts som sedan konas till ursprunglig diameter.

Eftersom sprickbildningen är spänningsstyrd och slipning av sprickor medför lokalt högre spänningar än tidigare får man räkna med att nya sprickor uppstår i kritiska områden. För att bestämma den återstående livslängden är återigen spännings- och skadetålighetsanalysen central. Dessutom måste verksamma skademekanismer fastställas och det måste finnas tillväxtlagar för dessa. Eftersom olika skademekanismer kan orsaka sprickor i ångdomar gäller det att vara medveten om precisionen av de olika modeller för beräkningarna som står till buds. Använda materialdata måste vara relevanta. Brottmekaniska metoder beskrivs närmare i **kapitel 1.8**.

Bedömningar av den återstående livslängden kan vara baserad på olika villkor. Följande villkor kommer att behandlas här:

- Korrosionsskador hittas vid provning.
- Sprickor hittas vid provning.
- Sprickor hittas vid provning och åtgärder utförs i syfte att förhindra eller fördröja återkommande sprickbildning.
- Inga sprickor hittas vid provning.
- Ingen provning utförs i samband med bedömningen.

*Korrosionsskador hittas vid provning*

Korrosionsprodukter avlägsnas, inte minst för att se att inte lokalt mer djupgående korrosion döljer sig därunder. Den korrosion som första hand kan leda till reducerad livslängd är gropfrätning och spaltkorrosion, som vid kritiska positioner också kan underlätta sprickinitiering. En första åtgärd är att studera vattenkemin och vattenmiljön för att identifiera korrosionens uppkomst och sedan om möjligt göra justeringar som kan förhindra att skadorna kommer tillbaka. Vad gäller spalter i tubinfästningar är det brukligt att bearbeta dessa och eventuellt svetsa så att inga spalter finns kvar för att bli av med problemet.

Tillväxt av gropfrätning är oregelbunden och därför svår att uppskatta. Detta måste beaktas vid användning av brottmekaniska analyser för bedömningar av spricktillväxt från frätgropar.

*Sprickor hittas vid provning*

I de fall där svetsreparationer inte utförs kan den återstående livslängden sättas lika med den livslängd en skadetålighetsanalys ger med erforderliga säkerhetsmarginaler. Den säkra återstående livslängd som kan beräknas påverkas av hur osäkra underlagen på drift historia, framtida driftparametrar, skademekanismer, skadeorsaker, materialdata, och tillståndsbestämningar av ångdomen är i övrigt. Rekommenderade intervall för återkommande inspektioner bör ta hänsyn till de eventuella osäkerheter som råder. Detta innebär typiskt att det högst skulle kunna röra sig om hälften så lång tid som den återstående livslängden som beräknats med säkerhetsmarginal.

Den uppdaterade spännings- och skadetålighetsanalysen visar hur djupa sprickor som är acceptabla efter slipning. Med relevanta tillväxtlagar beräknas:

- Lämpliga provningsintervall. Eftersom spricktillväxten styrs av frekvensen starter för bland annat den vanligaste skademekanismen hos domar, SICCC, är det viktigt att beakta antal starter- och stopp under en driftsäsong.
- Hur länge man återkommande kan hålla på att slipa ur sprickor tills oacceptabla sprick/slipdjup har uppstått.

Om en reparation genomförs kan en återstående livslängd beräknas på det reparerade tillståndet. Det är väsentligt att reparationen dokumenteras på ett tillfredställande sätt. OFP rekommenderas i början av den fortsatta driften, typiskt efter ett halvår. Sedan rekommenderas generellt OFP vid varje revision. Omfattning och detekteringsnivå bestäms av analysresultaten.

*Sprickor hittas vid provning och åtgärder utförs i syfte att förhindra eller fördröja återkommande sprickbildning.*

Då uppenbara orsaker till sprickor kan identifieras och åtgärdas genom att avlägsna eller reducera de orsakande påkänningarna kan den återstående livslängden beräknas med hänsyn till åtgärderna (trycksänkning är den vanligaste åtgärden). Intervall för OFP bestäms på underslag av utförd skadetålighetsanalys.

*Inga sprickor hittas vid provning*

Om inga sprickor hittas vid provningen kan en skadetålighetsanalys som baseras på de spricktyper och sprickstorlekar som bedöms kunna vara oupptäckta efter provningen. Den minsta återstående livslängden kan därefter beräknas. Om analysen indikerar en kortare återstående livslängd än den planerade kan det övervägas att utöka och förfin

provningen. Positiva resultat skulle då innebära gynnsammare förutsättningar för livslängdsstyrning och att en längre återstående livslängd kan planeras.

*Ingen provning utförs i samband med bedömningen*

Studier av de underlag som finns ger en uppfattning om risken för skador i ångdomen. Provning kan vara omotiverad i till exempel följande situationer:

- Relevant provning har genomförts nyligen.
- Inga särskilda påkänningar som kan föranleda skador kan identifieras vid granskning av ett tillfredställande underlag samtidigt som det är relativt lång tid kvar till den uppskattade livslängden (t ex 40 år).
- Ångdomen är relativt ny.

En återstående livslängd kan beräknas med resultat av nyligen utförd, relevant provning och börja från den tid då den utfördes. I praktiken är sannolikt den tidigare provningen inte avpassad med hänsyn till de önskvärda analyserna vilket medför relativt osäkra bedömningar av den återstående livslängden.

Om det säkert kan bedömas att ångdomen inte kritiska laster eller miljö kan livslängden av erfarenhet åtminstone förväntas uppgå till i storleksordningen 40 år.

För nya såväl som gamla ångdomar kan ändring av driftsätt från baslast till mer cyklisk drift få en betydande inverkan på livslängden.

Sammanfattningsvis rekommenderas att bedömningar av den återstående livslängden på ångdomar görs med utgångspunkt av spännings- och skadetålighetsanalyser med därtill hörande känslighetsanalyser. I många fall kan en rättfram metodik användas men med många antaganden riskerar beräkningarna ge överkonservativa resultat. Större förståelse för hur inkubationstider till sprickinitiering kan hanteras för flera av de skademekanismer som uppträder i ångdomar är dock önskvärd.

En allt längre återstående livslängd kan alltså förutsägas för en ångdom ju säkrare grunderna för bedömningen är. Säkra grunder innebär en gedigen kontroll av alla de faktorer som kan reducera livslängden. Det kan innebära mer eller mindre omfattande oförstörande och även förstörande provning för att erhålla behövlig information om tillståndet.

## REFERENSER

- Fuhlrott H., Kaiser E., Kunst A & Litzkendorf M. 1984. Ursachen und Bewertung von Rissen in Dampfspeichertrommeln, VGB Kraftwerkstechnik 64, 709-715.
- Hernas A. & Mirecki L. 1997. Life assessment methods for low alloy drum steels after long term service, Cape'97 Ageing of materials and methods for the assessment of life-times of engineering plant, R. K. Penny (ed.), Balkema, Rotterdam pp. 181-190.
- Gladh M. & Skog E. 1996. Undersökning av försprödning och försprödningsmekanismer i material vid långa drifttider, Värmeforskrapport 579.
- Storesund J. 1996. Oförstörande provning för livslängdsbedömning av högttemperaturanläggningar, Värmeforskrapport 587.

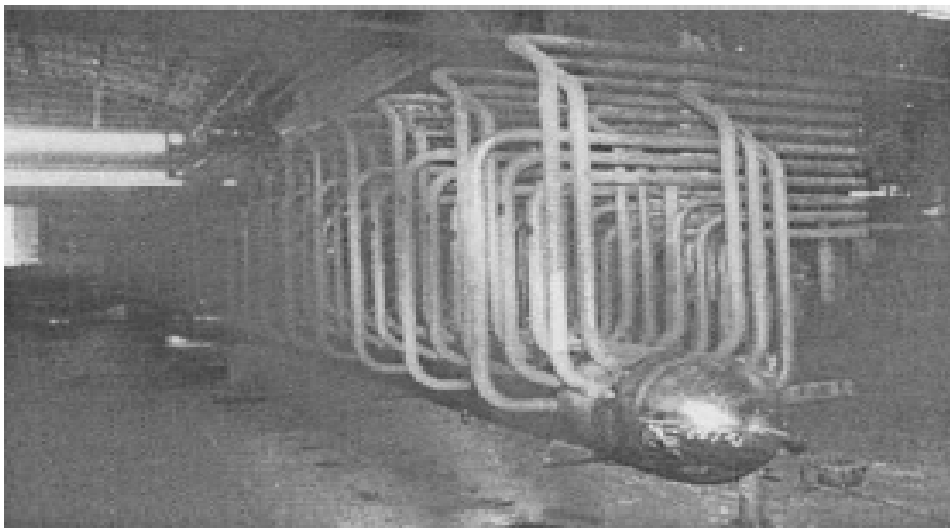
### 2.1.3 Ånglådor

#### Konstruktion

Den ånga som genomströmmas i överhettare samlas i samlingslådor och fördelas i fördelningslådor. De tubslingor som utgör överhettaren ansluter till ånglådan i rader längs lådan. De tubslingor som ansluter till lådan vid samma position i axiell led brukar kallas för en överhettarskärm. Ånglådans konstruktion består i regel av ett tjockväggigt varmvalsat rör med borrarade hål i vilka tuberna svetsas eller valsas fast. Gavlarna kan vara plana, rundade eller koniska. Ett exempel på en ånglåda visas i Figur 2.1-8, stutsar och T-anslutningar kan också förekomma på ånglådan, **se Figur 2.2-4 i avsnitt 2.2.3.**

Antalet tuber som ansluter till ånglådan kan variera stort för olika konstruktioner och pannstorlekar. I stora pannor kan hundratals tuber vara anslutna i många rader till långa ånglådor. Stora pannor kan även vara konstruerade så att tuberna i ett tubpaket delas upp på flera små ånglådor. Det finns ånglådor där manteln utgörs av en böckad plåt med en raksvets längs lådan. Sådana konstruktioner finns dock inte i svenska anläggningar.

Samlings- och fördelningslådor till primäröverhettare har ofta designtemperaturer under krypområdet. För varje överhettarsteg blir temperaturen högre och det är vanligt med krypdimensionering (se avsnitt 1.5.2) från och med sekundäröverhettaren. Antal överhettarsteg kan variera beroende på pannans konstruktion och prestanda. Samlingslådor för den sista överhettaren, som i flertalet kraftvärmepannor är tertiär, utgör i regel också utloppet till huvudångledningen.



Figur 2.1-8. Exempel på utformning av en samlingslåda.

Figure 2.1-8. Example of design of a header.

Typiska diametrar på ånglådor är 300-500 mm i svenska anläggningar. Utomlands finns stora pannor där ånglådornas diametrar större. Beroende på ånglådans storlek och material kan vägg tjockleken typiskt variera från ca 20 till 100 mm. Samlings- och fördelningslådor till eventuell mellanöverhettare har större diameter och klenare godstjocklek än samlingslådor till huvudångledningen eftersom trycket är betydligt

lägre (ansluter till mellantrycksdelen i turbinen). Diametrar och vägg tjocklekar i anslutande tuber håller sig vanligen mellan 30-100 respektive 3-10 mm. Skillnaden i diameter och vägg tjocklek mellan själva lådan och de anslutande tuberna är alltså stora.

#### *Material*

De typer av material som används i ånglådor är vanligen samma låglegerade, martensitiska eller austenitiska kryphållfasta stål som används för ångledningar. En sammanställning av sådana återfinns i Tabell 2.2-1 i kapitel 2.2. Liksom för ångledningar är låglegerade stål vanligast och austenitiska stål förekommer inte i svenska anläggningar. Martensitiska 9 % Cr-stål får allt större användning i nya anläggningar och vid utbyten av komponenter såsom ånglådor. Sådana stål har en avsevärt bättre kryphållfasthet än de låglegerade vilket innebär att vägg tjockleken kan reduceras kraftigt.

Eftersom beräkningstemperaturen inte är lika för alla ånglådor i en panna kan materialvalet anpassas till denna så att olika ånglådor består av olika material.

##### *2.1.3.1 Skador i ånglådor*

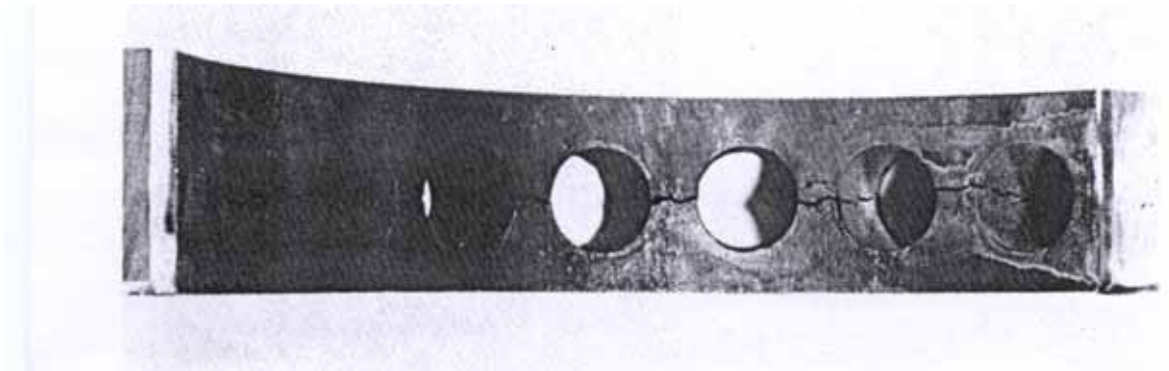
#### *Ligamentsprickor*

De skador som orsakat mest problem i ånglådor är så kallade ligamentsprickor. Det är sprickor som vanligt uppstår på insidan men även inuti godset vid de hål där tuberna ansluter. Sprickorna utbreder sig i ligamenten mellan hålen. Eftersom avståndet mellan hålen ofta är korta blir sprickorna kritiska vid relativt små storlekar. Beroende på konstruktionen propagerar sprickorna mellan tuberna i främst längdled eller omkretsled. Dessutom växer de mot ytterytan (samt innersidan vid initiering inuti godset). Om avståndet mellan hålen är tillräckligt stora strålar ofta flera sprickor ut från hålet i ett stjärnliknande mönster. Ånglådor med korta avstånd mellan hålen har en högre skadefrekvens än sådana med längre. Ett avstånd som är lika med tubhålets diameter har omtalats som ett kritiskt värde för stora skadefrekvenser men skadefrekvensen ökar även med man-telns vägg tjocklek. Figur 2.1-9 visar exempel på ligamentsprickor.

Ligamentsprickor i ånglådor orsakas av termisk utmattning. De geometrier och vägg tjocklekar som är typiska vid tubhålen är känsliga för sådana skador. Ligamentsprickor är oftast oxidfyllda och har ofta en långsam tillväxt men det finns fall där den varit relativt snabb. Initiering av sprickorna kan ske alltifrån korta till långa drifttider. Den avgörande orsaken till sprickbildningen har visats bero lastväxlingar i pannan som resulterar i växlande temperaturer i tubslingor. I samlingslådor utjämnas temperaturen och vid genomföringar där den tunna tubväggen möter den tjockväggiga manteln till lådan uppstår termiska spänningar. Det kan räcka med temperaturskillnader på ned till 30°C för att sprickor ska kunna bildas. Värmeforskriften 1176 redogör för denna sprickbildning i detalj.

Ligamentsprickning är internationellt vanligt förekommande men har bara rapporterats i ett fåtal svenska anläggningar. Det har då varit långt gångna skador som har lett till läckage. Sannolika orsaker är att de flesta ånglådor i de svenska anläggningarna aldrig har provats med avseende på ligamentsprickor och att frekvent lastväxling kan vara mindre vanligt förekommande. Barkpannor är dock ofta

förknippade med lastväxling under drift och det är också i ånglådor hos sådana som skador har inträffat.



**Figur 2.1-9.** Insidiga ligamentsprickor i en utskuren del av en ånglåda (ERA Technology).

**Figure 2.1-9.** Inside ligament cracking in a cut piece of a header (ERA Technology).

### *Krypskador*

De ånglådor i en panna som håller de högsta temperaturerna är i regel mest benägna att utveckla krypskador. Ånglådor som håller lägre temperaturer kan dock vara tillverkade av stål med lägre kryphållfasthet vilket kan föranleda att skador uppstår i lika stor utsträckning som i de som håller högre temperaturer. Dessutom kan benägenheten till skador bero den geometriska utformningen vilken inte nödvändigtvis är densamma för alla ånglådor i en panna.

Besvärliga krypskador kan uppstå i ånglådor med plana gavlar. Spänningskoncentrationer uppstår då på mantelns insida intill gaveln, vilket kan ge upphov till krypsprickor som propagerar från insidan mot utsidan. Ofta är gaveln fogad med en rundsvets belägna i detta område vilket ökar risken för sprickor (se **avsnitt 2.2.6**). Koniska gavlar är betydligt mindre benägna för sådana skador. Inspektionsstutsar kan finnas mitt på gaveln är på motsvarande sätt känsliga för krypning som själva gaveln. Ett krypbrott hos en plan gavel ger mycket allvarliga konsekvenser. En sådan olycka finns beskriven i Värmeforskrappport 978.

Vissa konstruktioner kan ha rundsvetsar vid stutsar som av geometriskäl är kritiska för krypskador på liknande sätt som för formstycken, se **avsnitt 2.2.3**.

Krypsprickor är också vanliga runt tubinsvetsningar. Drag- eller böjpåkänningar på tuberna, till exempel som en följd av felaktig upphängning, formförändring eller förskjutning av ånglådan samt låg flexibilitet i den anslutande tuben, kan orsaka en relativt snabb uppkomst av sådana skador.

Ånglådor med raksvetsar används inte i Sverige. Risken för haverier i sådana raksvetsar kan vara stor precis som för raksvetsade rör, se **avsnitt 2.2.1 Allmänt om ångledningar**.

Mantlarna till ånglådor visar sällan skador i form av krypkaviteter och krypsprickor undantaget intill grövre anslutningar. Det har emellertid förekommit att ånglådor formförändrats kraftigt genom krypdeformationer under inverkan av egenvikten. Ojämn temperaturfördelning längs ånglådan med lokala övertemperaturer är inte ovanligt och kan skynda på sådana skador. Övertemperaturer ger en hastigare



sfäroidisering, det vill säga förgrovning och upplösning av vissa beståndsdelar i mikrostrukturen, än vid den nor-mala drifttemperaturen vilket sänker kryptöjningsmotståndet och kryphållfastheten.

#### *Andra skademekanismer*

Vare sig korrosion eller andra skademekanismer allmänt kända för att begränsa livsläng-den av ånglådor.

#### *2.1.3.2 Provning av ånglådor*

Visuell provning (VT) bör utföras så att eventuella felaktiga upphängningar, formförändringar eller förskjutningar av ånglådan och anslutande tuber kan registreras. Åtkom-ligheten för VT kan vara begränsad och detta skall i så fall noteras vid provningen.

#### *Ligamentsprickor*

Ånglådor är av utrymmesskal i regel inte möjliga att krypa in i för invändig inspektion. För sådana där detta är möjligt underlättas provning av skador som ligamentsprickor som främst visar sig på insidan. Detta beskrivs i avsnitt 2.1.2.2 Provning av ångdomar.

Ett vanligt sätt att söka efter ligamentsprickor är att använda ett endoskop med videokamera. Endoskopet ges vanligen tillträde genom en avskuren tub eller en inspektions-stuts. Undersökningen måste vara anordnad så att ligamenten kan avsynas tillfredstäl-lande. Möjligheterna att detektera sprickor avgörs dels av faktorer som utrustningens kapacitet och provarens erfarenhet och dels av ytans beskaffenhet. Innerytorna är täckta av oxider som ofta döljer ligamentsprickor, särskilt fina sprickor. En tillfredställande betning av oxider inuti ånglådan kan därför vara att rekommendera innan provningen för att den skall kunna vara meningsfull. Eventuella sprickor som har initierats inuti godset och ännu inte penetrerat innerytan kan inte upptäckas med endoskopi förrän i sena stadier av sprickbildningen, då innerytan har hunnit bli penetrerad.

Ultraljudprovning (UT) är ett alternativ eller komplement till endoskopi. Både på insidan ytbrytande och inre ligamentsprickor kan upptäckas. Dessutom kan storleksbestämningar göras med diffraktionsteknik. Möjligheter och begränsningar med diffraktionstekniker som tillämpats för storleksbestämning av ligamentsprickor finns beskrivet i Värmeforskrappport 587 (Storesund 1996). Tätt sittande tuber och ånglådans rundade form är faktorer som ofta begränsar möjligheterna till storleksbestämningar. För detektering av sprickor används konventionell UT innan eventuell storleksbestämning. Även vid detektering måste ånglådans geometri studeras så att den befintliga utrustningens eventuella begränsningar och de modifieringar av utrustningen som i så fall kan göras för att öka provningens möjligheter klarställs.

Penetrantprovning och replikteknik har använts vid undersökningar av ligamentsprickor men svåråtkomlighet genom avskurna tuber gör dessa metoder opraktiska.

#### *Krypskador*

Eventuella inre krypsprickor vid gavlar kan provas med UT. Krypsprickor är inte den vanligaste typen av skada som detekteras med UT. Provningsoperatören måste vara in-förstådd med de provningsförfaranden som på bästa sätt indikerar eventuella kryp-

sprickor i den här tillämpningen. Därför bör ritningsunderlag och kännedom om hur krypskador kan utbreda sig vid gavlar införskaffas.

Provning av rundskarvar och eventuella rörstutssvetsar på ånglådan med avseende på krypskador utförs typiskt med magnetpulver- (MT) och replikprovning på likadant sätt som för rundskarvar på formstycken, se **avsnitten 2.2.3.2** och **2.2.6.2**.

Kartläggning av tillståndet vid tubinfästningar med avseende på krypskador kan innebära tidskrävande arbeten eftersom tuberna oftast är många och svåråtkomliga. Svetsar runt infästningarna har oftast rågar som är besvärliga att slipa till det skick som bör föreligga vid MT och replikprovning. Nedan följer några faktorer som spelar in på hur en provning kan genomföras:

1. Ändamålet är en bedömning av den återstående livslängden: Större genomföringar medför generellt högre spänningskoncentrationer än mindre. Vid replikprovning bör därför eventuella rörstutsar prioriteras framför anslutningar för överhettartuber. Skadade tubinfästningar kan relativt enkelt ersättas med nya eller repareras temporärt jämfört med större stutsar varför behovet av att bevaka en eventuell skadeutveckling inte är lika stort som för de tjockväggiga delarna av komponenten.
2. Med ändamålet att undvika risken för sprickor som kan leda till läckage i drift är det tillräckligt med MT. Lämpliga provningsintervall baseras på uppnådda drifttider.
3. Resultaten av visuella inspektioner samt uppmätning av temperaturfördelningen längs ånglådan kan ge vägledning i ett lämpligt urval för provningen.

Värdet av olika provningsfilosofier diskuteras närmare i nästa avsnitt 2.1.3.3. 'Återstående livslängd hos ånglådor'.

För detektering av sprickor och defekter rekommenderas MT. I princip bör alla tubinfästningar provas. Provningen kan eventuellt begränsas om områden med signifikant förhöjda påkänningar kan identifieras. Tillfredställande ytpreparering kan innebära opraktiskt stora insatser. Om ytan inte är fullgod bör detekteringsgränsen för den provade ytan uppskattas. Fortsatt drift med denna detekteringsgräns bör sedan analyseras för att avgöra lämplig tid till en återkommande provning där inga skador påträffas. Den bästa framförhållningen är att göra detta innan provningen så att åtgärder på ytprepareringen kan göras om det skulle visa sig att detekteringsgränsen är för stor.

Påträffas sprickor eller defekter rekommenderas replikprovning i syfte att fastställa skadans art. För samlingslådan för utgående ånga, dvs. den varmaste ånglådan, kan status med avseende på krypskada rekommenderas även för stutsanslutningar för överhettartuber. Minst tre tuber vid vardera tre positioner längs lådan kan rekommenderas.

#### *Temperaturövervakning och övertemperaturer*

Temperaturfördelningen längs en ånglåda mäts med termoelement. Det är viktigt att termoelementens antal och placering ger en representativ bild av temperaturfördelningen. Temperaturövervakning kan rekommenderas för ånglådor med förutsättningar för temperaturvariationer längs lådan, t.ex. sådana som arbetar med en omfattande lastcykling. Om temperaturen inte har övervakats kan en uppfattning om de termiska påkänningarna som varit längs lådan erhållas genom replikprovning (**avsnitt 1.6.6**), hårdhets-mätning (**avsnitt 1.6.8**) samt mätning av oxidtjocklekar (**avsnitt 1.6.5**). Med replikprovning kan, utöver graden av eventuella



krypskador, även graden av förgrovning av mikrostrukturen avgörs. Detta kan indikera områden som haft förhöjda temperaturer och med hårdhetsmätning kan det avgöras om materialet har mjuknat på grund av detta. Med mätning av magnetittjocklekar med ultraljudteknik kan en genomsnittlig effektiv metalltemperatur uppskattas. Huruvida eventuella övertemperaturer kan ha varit höga och kortvariga eller måttliga och långvariga är osäkert att bedöma från provningen.

#### 2.1.3.3 Återstående livslängd hos ånglådor

Det är väsentligt att undersöka tillståndet av ånglådor eftersom ett haveri kan få katastrofala konsekvenser. Det kan ta upp till 1 år att införskaffa samt 2 månader att installera en ny ånglåda. Äldre ånglådor i pannor med frekvent lastväxling är förknippade med de största riskerna för skador.

I likhet med många andra komponenter är utgångspunkten för att genomföra en bedömning av den återstående livslängden att sammanställa tillgängligt underlag på ritningar, tillverkningskontroll, driftshistoria och tidigare provning. Sannolikt är underlaget begränsat i jämförelse med det önskvärda. Sammanställningen ger dock, oavsett sina begränsningar, en uppfattning om vad som behöver göras för att undersöka ånglådans tillstånd utan att förbise faktorer som påverkar livslängden. Vissa typer av skador kan kanske uteslutas medan andra kan förväntas. Ovissheten om vilka skador som kan förväntas eller inte ökar med ökande begränsningar i underlaget.

Redan vid en inledande visuell inspektion kan ånglådan visa sig vara i sådant skick att man skulle vilja byta ut den genast, till exempel på grund av deformationer. Då utförs all provning som erfordras för att kunna avgöra om den kan vara funktionsduglig i drift tills en ny ånglåda kan installeras. Analys av provningsresultaten visar om fortsatt drift kan tillåtas och i så fall om åtgärder samt driftrestriktioner måste göras.

Om ånglådan efter VT inte har skador som kan bedömas vara oacceptabla för fortsatt drift vidtar undersökningar för att avgöra begränsningar i livslängden på grund av termisk utmattnings (ligamentsprickor) och krypning. De skador som kan eller skulle kunna förväntas på de grunder som beskrivits ovan eftersöks i första hand. Det förhållningssätt som bör hållas vid en bedömning av den återstående livslängden i relation till hur provning genomförts beskrivs nedan.

#### *Ligamentsprickor*

I många fall föreligger risker för ligamentsprickor vilka är besvärliga att prova på ånglådor. Det är därför viktigt att avgöra detekteringsgränser för den provning man har gjort och om den inte varit 100-procentig till sin omfattning, analysera konsekvenserna av detta, för att kunna bedöma den återstående livslängden på ett säkert sätt.

Påträffas sprickor är avverkning av de skadade ligamenten och svetsreparationer möjliga att genomföra. Detta innebär omfattande insatser där tuber kapas och speciella tekniker för slipning samt svetsning får användas innan nya tuber sätts in (Smith 1996). Det finns även fall med många sprickor där en stor del av manteln tagits ut och en ny del svetsats in (Hickey 1994). Den nya delen har då varit en bockad plåt med färdiga hål för tuberna. Genom att mäta lokala temperaturvariationer, bestämma sprickstorlekar och genomföra skadetålighetsanalyser är det också möjligt att beräkna spricktillväxten. Det är möjligt att låta sprickorna vara kvar en period om de har kunnat storleksbestämmas på ett tillfredställande sätt och har visats att med god säkerhetsmarginal inte uppnå oacceptabla storlekar under perioden.

Om sprickor inte påträffas får man räkna med att sprickor upp till detekteringsgränsen kan finnas. Med uppmätta eller konservativt uppskattade temperaturvariationer i överhettarna och en skadetålighetsanalys kan livslängden till acceptabla sprickdjup beräknas. En lämplig tidsperiod till att åter prova komponenten och en minsta återstående livslängd kan avgöras på detta sätt. En känslighetsanalys rekommenderas alltid, se **avsnitt 1.8 Spännings- och brottmekaniska analyser**. I princip medför större osäkerheter mer konservativa beräkningsresultat. Detta kan leda till förutsägelser om den återstående livslängden som är mycket kortare än den verkliga.

En skadetålighetsanalys kan med fördel göras innan provningen för att avgöra detekteringsgränsens inverkan på resultatet av beräkningen. En stor initieell sprickstorlek kan innebära en kort beräknad återstående livslängd i jämförelse med en liten. Detta indikerar hur noggrann provningen måste vara för att meningsfullt kunna användas till brottmekaniska beräkningar och bedömningar av den återstående livslängden.

### *Krypning*

Bedömningar av den återstående livslängden av krypskador som kan förväntas vara koncentrerade till ytterytan och som provas med replikteknik görs på ett likadant sätt som för komponenter på ångledningar, se **avsnitten 2.2.3.2, 2.2.5.2** och även **1.5.6**. Skador som uppstår på insidan av godset vid plana gavlar kan upptäckas först då krypsprickor bildats. Det är möjligt bestämma sprickstorleken och beräkna krypsprickpropageringen för att avgöra om fortsatt drift kan ske tills det går att reparera eller byta ånglådan. Om inga sprickor hittas kan en skadetålighetsanalys göras med provningens detekteringsgränser som utgångspunkt.

Tubinsvetsningar i utgående ånglåda bör provas 20 - 100 procent med MT då designlivslängden har uppnåtts. Om krypsprickor påträffas kan nya tubdelar svetsas in eller en svetsreparation utföras. Sådana åtgärder behöver inte vara direkt avgörande för ånglådans livslängd. Reparationssvetsningar måste dock även i de här fallen vara noggrant planerade och utförda på ett kvalificerat sätt eftersom det annars är mycket vanligt att sprickor återuppstår.

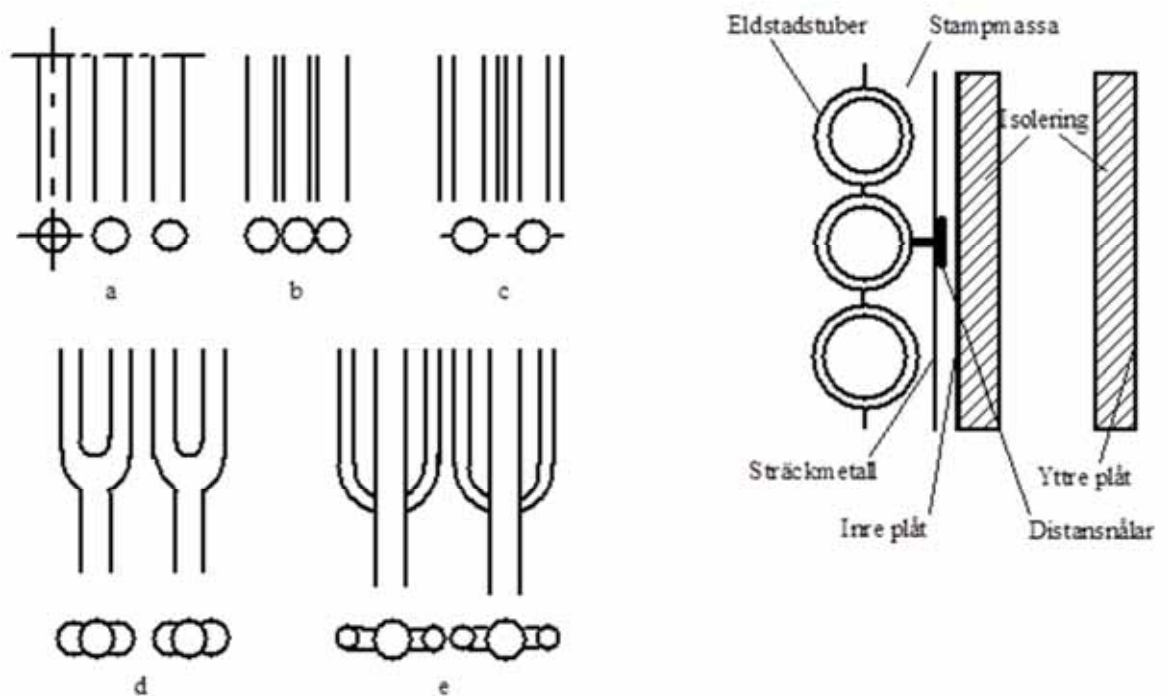
### REFERENSER

- Hickey J. J., Bulloch J. H & Horgan G. 1994. A partial shell wall seam weld repair of a 2,25Cr1Mo Header: an assessment of the toughness properties after some 20 000 hours service. Proc. Int. EPRI Conf. Welding & Repair Technology for Fossil Power Plants, March 23-25, 1994, Williamsburg, Virginia.
- Jones G. T., Sanders J. D., Jarvis P. & Coomber C. J. 1995. The PLUS system on-line operations & maintenance software for power plants, VTT-SYMP-151, Edited by S. Hietanen & P. Auerkari, pp.461-484.
- Smith S. M. 1996. Welded repair of thermal fatigue cracking in 2,25Cr1Mo reheat outlet header ligaments.
- Proc. 2nd Int. EPRI Conf., Welding & Repair Technology for Fossil Power Plants, May 21-24, 1996, Daytona Beach, Florida.
- Storesund J. 1996. Oförstörande provning för livslängdsbedömning av högheteranläggningar, Värmeforskrapport 587.

## 2.1.4 Panntuber

*Konstruktion*

Alla pannor utom de äldsta typerna är vattenrörpannor vilket innebär att eldytan är uppbyggd av relativt kläna rör, så kallade tuber. Eldstadsväggarna består av panntuber intill varandra. Tak och även golv utgörs av tuber i många konstruktioner. Vattnet och vattenångblandningen cirkulerar i tuberna och i dagens anläggningar tas huvudparten av värmet från eldstaden till pannväggarna upp genom strålning (värmeöverföring från flamma) och en mindre del genom konvektion (värmeöverföring från rökgas). I pannor med fluidbäddar sker dock en betydande del av värmeöverföringen genom så kallad partikelkonvektion. Det finns flera typer av eldstadsvägg, se Figur 2.1-10. De vanligaste typerna består av fentuber eller tätt ställda tuber. Genomförningar, hårt värmebelastade ytor och eldstadsvägg som inte är hopsvetsade skyddas av en stampmassa.



Figur 2.1-10. Exempel på olika typer av eldstadsvägg: a) glest ställda tuber, b) tätt ställda tuber, c) fentuber, d) gaffeltuber, e) sidrörstuber.

Figure 2.1-10. Examples of different types of furnace walls: a) adjacent tubes, b) remote tubes, c) fin tubes, d) fork tubes, e) side pipe tubes.

Panntuberna är oftast bockade där panelväggarna böjer av och vid genomförningar i dessa. I genomströmningspannor utgörs väggarna av tuber som går upp i spiralform. Kallbockning är det vanligaste förfarandet. Tubpaneler och tubdelar är svetsade till varandra och till fördelningslådor i botten samt samlingslådor eller domar upptill i pannan. Tubdimensionerna är typiskt 40-80 mm i diameter och 4-8 mm i vägg tjocklek. De är dimensionerade med beräkningsvärden på varmsträckgränsen och med ett korrosionstillägg på vägg tjockleken. Toleranserna för vägg tjocklek och ovalitet kan vara ganska grova. Det finns även tuber med räfflad insida som är avsedda för pannor med höga ångdata som genomströmningspannor. Räfflade tuber är inte vanliga i

Svenska anläggningar. I fall av fentuber är fenan mellan två tuber vanligen 10-30 mm bred och 4-8 mm tjock.

Panntuber omfattar i detta kapitel de tuber som eldstaden eller reaktorn, som det brukar kallas i CFB-pannor, är uppbyggd av. Tuber i andra delar av pannan behandlas i andra kapitel som till exempel de för överhettare och ekonomisar.

Panntuber eller vattentuber, som sådana tuber även benämns, har i ostörd drift en insidig metalltemperatur som är något högre än vattnets eller vattenångblandningens temperatur. De temperaturer som uppnås är beroende av ångbildningstemperaturen som i sin tur påverkas av trycket i pannan. Beräkningstemperaturer för panntuber i dompannor uppgår vanligen till 350°C. I genomströmningspannor ökar temperaturen i tuberna successivt upp till den temperatur som råder där överhettare tar vid, vilket vanligen är betydligt högre än 350°C.

Temperaturen på den värmebestrålade utsidan hålls ned av vattnets kylande effekt från insidan. En pannkonstruktion kan utsättas för olika typer av störningar som äventyrar en fungerande temperaturbalans i panntuberna. Detta behandlas närmare i **avsnitt 2.1.4.1 Skador i panntuber**.

#### *Material*

Till panntuber används oftast varmhållfasta kol-manganstål. Detta gäller särskilt för tuber som kan karaktäriseras som vattentuber. I dompannor kräver temperaturbelastningen överlag inte högre legerade material än kol-manganstål eftersom de i sådana pannor får användas till de högsta beräkningstemperaturerna för panntuber. Hos pannor designade för höga tryck kan det dock behövas låglegerade stål av typ 15Mo3 eller 13CrMo4-5 pga. deras högre hållfasthet. I genomströmningspannor byts vanligen tubmaterialet stegvis allteftersom den ökande temperaturen genom pannan kräver material med högre värmestålighet.

För eldstadtuber gäller att den tryckbärande delen måste vara tillverkad av ferritiska stål, dvs. stål legerade med upp till högst 12 % Cr. Om miljön i eldstaden medför oacceptabla korrosions- och/eller erosionshastigheter för ferritiska stål behöver tuberna skyddas. De vanligaste skydden är:

- Keramisk infodring
- Compoundtuber med en yttre del av höglegerat material
- Påsvetsning med höglegerat svetsstillsatsmaterial
- Termisk sprutning (även kallat metallisering) med höglegerat

I Värmeforskrappport 1023 och 1168 beskrivs egenskaper, erfarenheter samt för och nackdelar med avseende på korrosions- och erosionsskydd för samtliga metoder ovan.

Det är dock långt ifrån självklart att skadeproblem kan lösas bara med att byta till ett annat material eller applicera en skyddande beläggning. Åtgärder vad gäller konstruktion, bränslen, förbränning och andra driftförfaranden är ofta nödvändiga för att förhindra skadebildningen.

I Tabell 2.1-2 ges en översikt av vanliga kol-manganstål för panntuber med Svensk standardbeteckning och närmaste motsvarigheter i EU-standard 10216-2, Tysk standard DIN 17175 och amerikansk ASTM standard. Högre legerade ferritiska stål som kan krävas i pannor med höga designtryck, t.ex. genomströmningspannor återfinns i avsnitt 2.1.5 Överhettare. Vad gäller påsvetsning eller användning av compoundtuber som skydd mot eldstadskorrosion är höglegerade austenitiska rostfria

stål, t.ex. Grade 310 (25Cr21Ni) eller nickelbaslegeringar, t.ex. Alloy 625 (58Ni(min)22Cr9Mo3,5Nb4Fe).

**Tabell 2.1-2 Legeringsinnehåll och materialbeteckning för vanliga stål i panntuber.**

| Kategori  | Mn-halt,<br>max temp | Svensk<br>beteckning | EN beteckning | Tysk beteckning | Amerikansk<br>beteckning |
|-----------|----------------------|----------------------|---------------|-----------------|--------------------------|
| C-Mn stål | 0,4-1,2%<br>400°C    | 1330-05              | P235          | St 35.8/I       | A192,<br>A106 Grade B    |
|           | 0,6-1,4%<br>400°C    | 1430-05              | P265          |                 |                          |
|           | 0,4-0,8%<br>475°C    |                      |               | St 35.8/III     |                          |
|           | 0,6-1,0%<br>475°C    | 1435-05              |               | St 45.8/III     | A210 Grade A-1           |

#### 2.1.4.1 Skador i panntuber

Skador i panntuber är vanligt förekommande. Påkänningarna kan ge förutsättningar för flera skademekanismer att verka. Till exempel har EPRI identifierat 22 grundläggande skademekanismer för kol- och oljeeldade pannor då pannans samtliga tuber inberäknas (Dimmer 1989). De flesta av dessa skademekanismer kan drabba de tuber som definierats som panntuber i detta kapitel. I USA fördelar sig 40 % av alla tubhaverier till panntuber. De 22 skademekanismerna klassificeras av EPRI enligt följande:

- Spänningsbrott
- Korrosion på vattensidan
- Korrosion på rökgassidan
- Erosion
- Utmattningsbrott

Dessutom finns skador som kan relateras till bristande kvalitetskontroll med i klassificeringen.

För att klargöra under vilka förutsättningar som skador kan börja uppstå kan följande indelning göras:

- Normal drift av panna.
- Drift av panna med störningar.
- Drift av panna med modifieringar i konstruktionen.
- Drift av panna med ändring eller variation av bränslen och förbränning.

Punkterna c) och d) hänger ihop med varandra till exempel då en panna ska konverteras från en bränsletyp till en annan. De kan också vara mer oavhängiga, till exempel om pannan är dimensionerad för en viss bränsleflexibilitet.

I det följande beskrivs effekterna av olika skademekanismer med hänsyn till förutsättningarna a)-d) ovan. Det finns en mångfald av skadeorsaker och olika skadefall. De kan vara generellt förekommande men de är många gånger specifika för olika pann typer, pannkonstruktioner och driftsätt. Skador uppkommer ofta på grund av att processtek-

niska och mekaniska fel har uppstått. Många gånger är orsaken till skadorna unika företeelser.

Beskrivningarna gör därför inte anspråk på att vara heltäckande för alla de skador som kan uppstå. För punkten a) ovan, normal drift av panna, skulle en panna kunna förutsättas vara konstruerad så att inga skademekanismer ger allvarliga skador på panntuberna under normal drift. I praktiken har det under det sedan åren kring millenniumskiftet funnits stora problem med att begränsa korrosionshastigheter till rimliga nivåer. Det beror på att många av de bio- och avfallsbränslen som då började användas i stor skala är mycket korrosiva i samband med förbränningen.

Brister i konstruktionen, brister i byggandet av pannan och driftparametrar som konstruktionen inte är avsedd för ger också ofta upphov till skador under vad som kan kallas normal drift. Det är viktigt att normala driftförhållanden övervakas och upprätthålls för att undvika eller åtminstone kunna minimera skador. Detta fordrar god kännedom om och uppmärksamhet på vilka störningar som kan förekomma.

Uppsikt måste även hållas på hängjärn och bärjärn till panntuberna. De kan skadas och ojämma belastningar kan uppstå som kan medföra oförutsedda laster och skador på pannväggar.

Panntuber och andra tuber havererar relativt ofta i jämförelse med andra tryckbärande komponenter i pannan och i anläggningen i övrigt. Haverierna kan bli explosionsartade med allvarliga effekter. Oftast uppstår läckor som i sig är begränsade men det är vanligt att de orsakar sekundärskador i pannan som kan bli omfattande. Det kan i sammanhanget nämnas att i sodapannor, som inte omfattas i denna utgåva av handboken, reagerar utströmmande ånga med pannans eldningsmedia så att risken är stor för mycket allvarliga explosioner. I sådana pannor är läckor mycket allvarliga ur säkerhetssynpunkt. I kraftvärmepannor har tubfläckningar inträffat som är allvarliga ur säkerhetssynpunkt. Det är när axiella sprickor bildas på den halva av tuben som är riktad ut mot pannhuset som det kan bli mycket allvarliga konsekvenser. Om sprickorna inte upptäcks kan en tubfläckning uppstå vilket resulterar att högttrycksvatten/ånga mycket snabbt strömmar ut i pannhuset, vilket innebär stor livsfara för de som finns i lokalen.

### *Korrosion*

a) Under normala förhållanden är korrosionen på panntuber liten. Flamtemperaturerna i eldstaden är höga (upp till 1600-1700°C) men kylningen från vattnet eller vattenång-blandningen i tuberna är god och tubernas yttemperatur uppgår typiskt upp till omkring 450°C. Vid denna temperatur beläggs tuberna med ett tunt och tätt oxidskäl (magnetitskikt) och utanpå detta en askbeläggning. Oxidskalet skyddar mot korrosion och tillväxer under normal drift så långsamt att betydande reduceringar av väggjockleken inte uppstår ens efter mycket långa drifttider.

Även insidan beläggs med ett tunt oxidskikt som skyddar mot korrosion. Oxidernas tillväxt är normalt långsam även på insidan. Även här är det magnetiten som svarar för korrosionsskyddet och för detta syfte det är viktigt att magnetiten är tät och vidhäftande.

Kritiska tjocklekar på oxidskalen som kan ge ökad korrosion är ofta förknippade med störningar i driften. Vid cirkulationsfel kan ångbildningen bli för stor, kylningen för liten och då kan hetvattenoxidation uppstå. Det innebär en magnetitbildning som kan leda till tubbrott relativt snabbt i och med att kvarvarande metalltjocklek har blivit så



tunn att den inte kan bära det inte övertrycket. I fall av överhettning, t.ex. vid en torrkokning av pannan kan onormalt tjocka vattensidiga oxider bildas som försämrar värmeöverföringen mellan tubens ytteryta och inneryta så att metall temperaturen stiger vilket kan öka korrosionen på rökgassidan. Detta kan också medföra materialdegradering och reducerad hållfasthet i tubmaterialet.

På grund av föroreningar i pannvattnet kan det bildas beläggningar utanpå oxidskikten. Kritisk tjocklek med avseende på värmeöverföring varierar för olika pann typer och panndata. Då en tjocklek på 150 µm har uppnåtts rekommenderas vanligen kemisk rengöring av pannan, se Värmeforskrapport 1202 för detaljerad information. Den typiska tillväxten är 10-15 µm per år. Tvättrester och en okontrollerad återuppbyggnad av det skyddande oxidskiktet då pannan tas i drift igen kan orsaka korrosion i tuberna.

b) Störningar av driften kan orsaka att oxidskalens skyddande effekt minskar eller förstörs så att korrosionen ökar.

Genomstömningspannor är särskilt känsliga för oxidtillväxt och beläggningar på insidan av panntuberna vid störningar av drift och processparametrar. Beläggningarna kan ofta bli så kraftiga att pannans effekt minskar.

Beläggningar på panntubernas insida kan bildas av korrosionsprodukter och hårdhetsbildande ämnen av kalcium och magnesium. Beläggningarnas tjocklek, uppbyggnad, och egenskaper avgör hur mycket kylningen försämras och känsligheten för korrosions. Ju högre metalltemperaturen är från början desto mindre temperaturförhöjning krävs för att allvarlig korrosion ska uppstå. Beläggningarna orsakas främst av att vattenkemin inte är fullgod. I porösa beläggningar kan salter ansamlas sig och avlagringskorrosion uppstår. I syfte att förhindra beläggningar finns riktvärden för skadliga ämnen vilket måste övervakas på ett tillbörligt sätt. Hantering av matarvatten behandlas ingående i Värmeforsks handbok i vattenkemi för energianläggningar (Bjurström 2001).

Insidiga beläggningar kan även orsaka allvarlig väteförsprödning. Sådana problem var vanliga på 60-talet men har även rapporterats senare, bland annat i Belgiska anläggningar (Eyckmans 1999) och huvudsakligen i pannor med över 200000 timmars drifttid. Skadorna drabbar mikrostrukturens perlit i kol-manganstål och resulterar i uppsprickning av korngränserna som, när de penetrerat en tillräckligt stor del av tubväggen, får denna att haverera av det inre övertrycket. Det typiska utseendet för sådana skador är så kallade "fönster öppningar" där en fönsterliknande del av tuben slits loss. Skadorna är ofta lokaliserade nära brännare, tubböjar samt sluttande eller horisontella tubpartier. De tillväxer från tubens insida på den halva av tuben som utsätts för rökgaserna. Skadebenägenheten antas öka vid:

- i) ackumulering av oxider under mycket långa perioder
- ii) dålig cirkulation
- iii) överlast
- iv) frekventa starter och stopp

Förhindrad vattenströmning i tuber höjer temperaturen vilket ökar korrosionen. Dessutom kan punktfrätning förekomma om strömningshastigheten är låg, särskilt vid högre pH-värden på pannvattnet (högre pH än pH7 är en förutsättning för punktfrätning).

Mekaniska laster kan resultera i spruckna oxidskikt som ger upphov till korrosion i form av gropfrätning eller SICC. Ett exempel är tryckvariationer i pannan som kan få



böjar i pannan att fjädra med spruckna oxidskikt som följd. Ett annat exempel är lokal inspänning av tuber så att oxidskikt spricker och SICC bildas (med inspänning menas att stora spänningskoncentrationer uppstår i samband med termisk expansion, t.ex. om ett golv och en vägg av fenade tuber är sammanfogade med svets).

c) Omkonstruktioner som till exempel placering och utformning av munstycken för lufttillförsel, sotblåsare och injicering av förbränningstekniska tillsatser förorsakar inte sällan lokala miljöer hos panntuberna som ger ökad korrosion. Vad gäller förändrad lufttillförsel kan reducerande förhållanden uppstå vid pannväggarna vilket kan leda till en både snabb och utbredd korrosion. Vid modifieringar av konstruktionen är det därför klokt att så noggrant som möjligt försöka förutse korrosionsrisken med det nya utförandet.

Detta gäller även större ombyggnationer, till exempel vid bränslekonverteringar. Korrosionsproblem uppstår inte sällan efter korta drifttider då nya konstruktionslösningar tillämpas.

d) Vid ändring av bränslen, variationer av bränsleblandningar och ändring av förbränningen kan reducerande förhållanden intill pannväggar uppstå vilket ofta resulterar i en kraftig korrosion på stora ytor. Reducerande förhållanden ger möjlighet till bildning av svavelväte och sulfidisering som har en mycket aggressiv inverkan, se **avsnitt 1.5.3.2.9**. Ofullständig, felfördelad eller ojämn förbränning orsakar ofta reducerande förhållanden.

Vid ändringar av bränslen och variationer av bränsleblandningar finns det risker med att klorhalten i bränslet inte hela tiden är kontrollerad och låg. Höga klorhalter ger ökad korrosion på panntuber, inte minst om reducerande förhållanden råder. Det är dock vanlig att klor får möjlighet att ansamlas sig. Under sådana förutsättningar uppstår korrosionen även om klorhalterna i bränslet är låga.

Bränslen som innehåller saltbildande ämnen (alkali och klor) med låga smältpunkter (bly, zink) medför risk för saltsmältakorrosion. Sådan ger generellt höga korrosionshastigheter, ofta lokalt, inte bara hos ferritiska material utan även korrosionsskydd med höglegerade compoundtuber eller påsvetsning kan få oacceptabla korrosionshastigheter.

Många pannor står stilla under längre tider och stilleståndskorrosion kan uppstå. Den vanligaste formen av stilleståndskorrosion är gropfrätning (pitting). Vid för panntuber normala strömningshastigheter uppstår sällan gropfrätning men risken ökar med lägre strömningshastighet och värst drabbade är stillastående pannor. Pannor som tas ur drift för en längre tid ska därför konserveras. De kan antingen torrkonserveras eller våtkonserveras (Persson 1999).

#### *Erosion och erosionskorrosion*

a) Under kontrollerade driftförhållanden drabbas panntuber i första hand av partikelerosion. För pannor med fluidiserad bädd utgör en kraftig partikelströmning av sand ett naturligt inslag. Erosionsskador orsakas av sand som faller ned längs väggarna. Andra pannor är i regel mindre känsliga för erosionsskador i panntuber men strömningen av aska och fallande slagg i rökgaserna kan mycket väl ge erosiva effekter i sluttande väggpartier. Exempel på erosionsskador och konstruktionslösningar som typiskt ger upphov till erosion ges i avsnitten 1.5.4 Erosion och 2.1.1 Panntyper.

b) Exempel på störningar och fel som kan ge erosionsskador är störningar i förbränningen och felaktigt fungerande sotblåsare.

Störningar av driften som resulterar i förhöjda metalltemperaturer i panntuber innebär en viss ökad risk för erosionsangrepp eftersom känsligheten för erosion ökar med temperaturen. Områden med turbulenta strömningar som tidigare inte varit stora nog att orsaka erosionsskador kan då bli kritiska.

c) Omkonstruktioner kan resultera i att turbulenta strömningar uppstår i pannan som ger erosionsskador. Den nya utformningen bör ta hänsyn till att erosion inte uppstår. Även små modifieringar kan ge upphov till erosion.

d) Förändringar i bränsle och förbränning förändrar ofta strömningsbilden i pannan. Dessutom kan den nya situationen innebära en partikelbildning med större erosiv inverkan än tidigare.

Vid störningar, omkonstruktioner, samt förändringar av bränsle och förbränning kan samtidigt korrosionen öka på flera olika sätt som beskrivits ovan. Korrosionen förstärks många gånger av de strömningsbilder med erosiva inslag som kan uppkomma, se **avsnitt 1.5.5 Erosionskorrosion**.

#### *Utmattning*

a) Vid starter och stopp blir de termiska påkänningarna stora vid svetsar till tubpanelernas upphängning i pannväggen och termiska utmattningssprickor kan uppstå. Termisk utmattning kan även uppstå i udda konstruktioner av fentuber (Ellis 1999), i konstruktioner som ger periodisk vattensprayning från asksamlare och från kondensat av mediet i sotblåsare (Dimmer 1989). Skador som orsakas av intermittenta kylningar av tubytan består typiskt av talrika sprickor som tillväxer genom tuben på de ytor som avkyls. Under vissa förhållanden kan vibrationsutmattning uppstå. Denna är beroende av svängningar av ångflödet i tuberna tillsammans med tubernas vibrationskaraktäristik som påverkas av mängden av utvändiga påslag och beläggningar.

b) Störningar i form av förhindrad vattenströmning i pannsystemen kan orsaka termisk cykling som leder till termisk utmattning i panntuber. Särskilt i horisontella partier i tak och golv kan ångfickor bildas. Sådana skador är ofta lokaliserade till bockade delar där effekterna av termisk cykling kan vara större. Effekterna är också större om ångfickor kan bildas på grund av den dåliga cirkulationen. Förutsättningar för att ångfickor bildas finns främst i horisontella partier.

c) För ombyggnationer bör man uppmärksamma konstruktionslösningar som till exempel svetsade upphängningar av panntuber som skulle kunna ge termiska utmattningssprickor.

#### *Övertemperaturer*

a) Övertemperaturer innebär temperaturer över det tillåtna och förekommer således inte under driftförhållanden som kan kallas vara normala. Ofta talar man, då övertemperaturer uppstått, om överhettningar och överhettat material (vilket inte skall förväxlas med överhettare och material i överhettare). Inverkan av övertemperaturer är beroende av hur stora de är och hur länge de får verka. Som det tidigare har nämnts ökar korrosionen. Vid tillräckligt höga övertemperaturer krypdeformeras materialet. Vid ännu högre temperaturer sjunker sträckgränsen så mycket att materialet fläks till brott i ett snabbt förlopp. Om materialet överhettats kan det degenereras så mycket att

det inte har tillräcklig hållfasthet vid fortsatt drift under normala driftförhållanden. Torrkokning av panna och dålig cirkulation är de vanligaste skälen till att övertemperaturer uppstår.

b) Fel och störningar i drift som till exempel en ojämn effekt mellan olika brännare, dålig cirkulation och tveksamma underhållsåtgärder som till exempel pluggning av tuber kan leda till ojämn temperaturfördelningar i pannan och övertemperaturer i panntuber. Igensättningar av tuber kan även orsakas av ackumulerat skräp och avlagringar.

#### *Tillverkningsdefekter*

Skador i panntuber kan bestå av materialdefekter och svetsdefekter. Normalt sett förväntas sådana upptäckas vid tillverkningens kvalitetskontroll. Emellanåt förekommer brister i denna och det finns exempel på stora slaggstråk i tubmaterialen och bindfel i svetsar som undgått upptäckt som sedermera orsakat haverier.

#### *2.1.4.2 Provning av panntuber*

Det kan finnas olika primära syften med provning av panntuber:

- i) kontroll av att tillverkningsfel inte uppstått vid modifieringar och ombyggnader samt reparationer av pannan
- ii) kontroll av att driftinducerade skador inte har uppstått
- iii) undersökning av utbredning och orsak då en skada har upptäckts

För punkt i) gäller det främst att utförda svetsarbeten provas på bästa sätt. MT, UT, och framförallt RT är relevant provning, se vidare i **kapitlen 1.6.1, 1.6.3 och 1.6.7**. Det är även viktigt att genom kontroller försäkra sig om att nyinsatta material inte har materialdefekter eller att reservmaterial inte har skadats under lagring. Under lagring kan till exempel korrosionsskador uppstå.

Visuell provning (VT) är alltid inledningen till kontroll och besiktning av pannan. För varje panna bör ett avsyningsprogram upprättas som är baserat på generella erfarenheter och det som bör tillämpas på den aktuella pannan. Värdet av provningen är starkt relaterat till inspektörens kunskap och erfarenhet.

Vid VT av panntuber kan eldstadssidig korrosion och erosion upptäckas. Önskade beläggningar kan kartläggas. I detta sammanhang inspekteras även andra komponenter och aggregat som till exempel stag, brännare, sotblåsare, och annan utrustning i genomförningar för eventuella fel som kan orsaka skador på pannväggar. I VT ingår även bedömning och uppmätning av eventuella förskjutningar och böjningar av pannväggar.

I det följande beskrivs hur olika OFP-metoder kan användas för att finna skador såsom:

- godsfortunning
- läckor
- sprickor
- svetsdefekter
- materialdefekter
- överhettat material
- väteförspredning.

### *Godsförtunning*

För att mäta allmän godsförtunning orsakad av korrosion och erosion har traditionellt särskilda godstjockleksmätare som utnyttjar ultraljud använts. Sedan i början av 2000-talet har dock metoder för skanning av hela panelväggars godstjocklek fått större användning. Skanning är överlägsen den traditionella punktmätningen. Eftersom eldstadskorrosion har blivit allt vanligare och mer oförutsägbar är skanning nödvändigt för att kunna fastställa status med avseende på godsförtunning. För detta ändamål används EMAT-teknik, vilken har mycket hög känslighet se **kapitel 1.6.3**.

I en annan scannerteknik tillämpas virvelströmsprovning (ET) på panntuber för att idetifiera eventuell gropfrätning. Stora områden kan avsökas relativt snabbt vilket ger goda förutsättningar för systematisk provning. För att avgöra om EMAT eller ET teknik eller om båda skulle behövas är lämpligast är det lämpligt att ta ut ett tubprov för att se om det finns signifikant gropfrätning. I fall av ET teknik behövs också ett sådant prov till att kalibrera utrustningen.

Traditionella tjockleksmätare mäter godstjockleken i en punkt och kartläggning av godsförtunning hos eldstadsväggar har i regel en alltför låg tillförlitlighet även om många och systematiska mätningar görs.

### *Läckor*

Ett tubhaveri startar ofta med en läcka som efter en tid utvecklas till att mer dramatiska skador, inte minst sekundärskador, uppstår. Detta kan förhindras om läckan upptäcks på en gång vilket kan ske med hjälp av akustisk emmision. Metodens tillförlitlighet har många gånger ifrågasatts för flera av dess tillämpningar. För läcksökning i panntuber har den dock användning (hittills främst i sodapannor) och utvecklas framgent. På senare tid har teknik lanserats som även möjliggör registrering då sprickor växer innan läckan uppstår.

Tekniken innebär att ett antal sensorer placeras ut på de områden som skall övervakas. Sensorn kan ta upp emmissionsvågor som emmiteras då en spricka växer eller en läcka uppstår och skicka signaler till en central enhet. Läckor och sprickor kan lokaliseras till den sensor som är närmast skadan. Många signaler uppstår dock även av andra orsaker och det kan vara svårigheter med att skilja dessa från signaler från läckor och sprickor. I dagens utrustningar har möjligheterna till detta förbättrats.

### *Sprickor*

Spricksökning är generellt förknippat med att identifiera kritiska positioner där de kan förekomma och att prova med relevanta metoder för den eller de typer av sprickor man letar efter. Exempel på kritiska positioner i panntuber för olika typer av sprickor ges i **avsnittet 2.1.4.1** ovan.

Sprickor orsakade av korrosionsutmattnings och spänningskorrosion initieras ofta på insidan av panntuberna och UT kan vara lämplig. För korrosionsutmattningsprickor, till exempel, tillämpas en skjuvvågsteknik med speciella prober som är tillverkade för att passa tuben. Panntubens godstjocklek kan dock vara så tunn att tillförlitligheten med UT blir kritisk, se vidare **avsnitt 1.6.3 Ultraljudprovning**. Även RT har användning och kan därför också vara nödvändig för att detektera insidiga sprickor i panntuber. Eftersom de flesta spricktyper kan initieras både på in- eller utsidan av panntuberna rekommenderas både UT (eller RT) och MT.

Krypsprickor bildas på utsidan av panntuber och kan detekteras bäst med MT. Vidare beskrivning finns under rubriken "Överhettning" nedan.

Ett provningsförfarande som väljs för att finna sprickor är förknippat med detekteringsgränser. Detekteringsgränserna är beroende både av provningsmetodik och av spricktyp. En analys av detta, vilket bör göras innan provningen, är väsentlig för att kunna avgöra värdet av provningen och möjligheterna till återstående livslängdsbedömningar. I **avsnitten 2.1.2.2** och **2.1.3.2** finns det mer beskrivet om detekteringsgränser vid provning av ångdomar respektive ånglådor. Den filosofi som presenteras där måste vara i åtanke och har användning även för panntuber. Detaljer i tillvägagångssättet vad gäller panntuber anpassas från fall till fall till behov och rådande situation.

Då sprickor eller defekter påträffas bör de karaktäriseras. Ett tubprov är alltid att föredra för detta ändamål. Vid utbredda indikationer av ytfel rekommenderas generellt replikprovning av indikationerna som komplement till tubprovet för att undersöka om eller verifiera att de är av samma art. Replikprovning av ytfel kan dock i sig ge tillräcklig information och det kan om speciella skäl föreligger vara lämpligt att avvakta med tubprovet.

#### *Svetsdefekter*

För att hitta svetsdefekter tillämpas i princip samma metoder som för detektering av sprickor: MT, UT och eventuellt RT. Tekniken måste dock anpassas till de förutsättningar som gäller för att finna olika typer av svetsdefekter, se **avsnitten 1.6.1, 1.6.3** respektive **1.6.6**. Karaktärisering av defekterna sker enligt samma principer som för sprickor ovan.

#### *Materialdefekter*

Materialdefekter kontrolleras i första hand vid kvalitetskontrollen. Om förekomst av materialdefekter bör undersökas av speciella skäl efter att anläggningen har tagits i drift så finns det möjligheter att med rimliga insatser göra detta med hjälp av virvelströmsbaserade metoder. Karaktärisering av defekterna sker enligt samma principer som för sprickor ovan.

#### *Överhettat material*

Överhettade partier av panntuber kan indikeras vid VT av att skalning eller korrosionssangrepp har uppstått. Provning av överhettat material i panntuber tillgår på samma sätt som för överhettare, se **avsnitt 2.1.5.2**.

#### *Väteförsprödning*

Väteförsprödning uppstår från insidan av panntuber och det finns ultraljudtekniker utvecklade för att detektera denna typ av skada med tillfredställande resultat. Provningen är dock tidskrävande och kan inte kvantifiera skadorna så att det kan avgöras hur långt gångna de är (Eyckmans 1999).

#### *Beläggningar*

Speciella ultraljudtekniker finns även utvecklade till att mäta oxidtjockleken på panntubernas insidor och de har haft omfattande tillämpning i USA (Viswanathan 1988). De skikt som skall mätas är relativt tunna och provningen har därför betydande begränsningar. Relativt stora variationen i panntubernas godstjocklek samt det faktum att oxid-

beläggningar ofta lossnar bidrar till att mätningarna blir osäkra. Dessutom kan beläggningarnas egenskaper orsaka felaktiga mätvärden. Lossning av oxidskikt sker för övrigt oregelbundet till frekvens och omfattning. Utsidiga beläggningar kan mätas med speciella skiktjockleksmätare, se **avsnitt 1.6.5**.

Tillväxten av beläggningar kan indikeras med mätningar av tubväggtemperaturen. Det finns dock svårigheter att avgöra samband mellan temperatur och tillväxt och dålig hållbarhet hos termoelementen är ett vanligt problem.

Status av eldstadstuber med avseende på korrosion, korrosionsskydd och beläggningar kontrolleras med tubprov. Det är den i särklass värdefullaste metoden för att studera beläggningar, se vidare under rubriken "Förstörande provning för analys av skador" nedan. Prover bör tas ut från ställen med högst värmebelastning. Konstruktion, bränsle och eldning varierar från panna till panna och det kan vara svårt att veta var värmebelastningen är högst i det enskilda fallet. Nivån i jämnhöjd med eller något över de övre brännarna är generellt lämplig för provtagning.

#### *Förstörande provning för analys av skador*

Om sprickor påträffas rekommenderas det att ta ut ett tubprov med spricka för metallografisk undersökning för att avgöra skademekanism. Tillsammans med all tillgänglig information om omständigheterna kring skadan kan:

- i) relevant provning på tubprovet avgöras, till exempel kemiska analyser, hårdhetsprovning, dragprovning, etc.,
- ii) skademekanismer verifieras,
- iii) skadeorsaker och åtgärder, så att skadan inte uppstår igen, utvärderas.

Om överhettning konstateras kan information om sträckgräns eller andra mekaniska egenskaper vara erforderliga. Detta kräver att tubprover tas ut från representativa positioner för bland annat varmdragprovning. Med tubprover kan även förfinade metallografiska analyser göras och oxidtjocklekar mätas med avseende på överhettning.

Orsaker till korrosionsskador kan undersökas med kemiska analyser. Särskilt analyser av oxidskikt, korrosionsprodukter och andra beläggningar på ytorna samt de korroderade metallytorna kan bidra till att fastställa skadeorsaker på ett avgörande sätt.

I många fall är det värdefullt att tillhandahålla ett tubprov från oskadade delar som referens.

Kontroll av beläggningar och kvalitén hos magnetiskt skikt samt eventuell korrosion görs återkommande i flertalet anläggningar genom metallografisk undersökning av tubprov. Lämpligt intervall för provuttagen är typiskt 3 år om allt ser bra ut. Bristande korrosionsskydd och beläggningar som börjar närma sig kritisk tjocklek föranleder kortare intervall och eventuella åtgärder.

Innan tubprover tas ut ska det säkerställas att uttagna prov blir tillräckligt stora och att lämpliga provpositioner väljs ut. Närmare beskrivning av vad man bör tänka på i samband med uttag och undersökning av tubprov ges i Värmeforskrapport 1202.

#### 2.1.4.3 Återstående livslängd hos panntuber

Den återstående livslängden av panntuber kan utvärderas under följande förutsättningar:

1. Skador har uppstått och den återstående livslängden utvärderas med dessa som utgångspunkt.
2. Inga signifikanta skador har upptäckts.

Under den första förutsättningen är det nödvändigt att finna orsaken till skadan. Materialundersökningar av olika slag såsom beskrivits ovan är grundläggande för detta. Skador är ofta orsakade av val av bränsle samt mekaniska eller processtekniska fel i pannans funktion. Medvetet ändrade driftförhållanden orsakar också ofta skador. Om skadorna och orsakerna till dessa undersöks omsorgsfullt kan i många fall åtgärder göras så att pannas fortsatta drift kan förväntas ske utan återkommande skadebildning. I detta sammanhang är det även väsentligt att avgöra huruvida skadorna utgörs av primär- och sekundärskador.

En bedömning av i vilken omfattning skador bör repareras eller kan tillåtas vara kvar består dels i att undersöka hur utbredda skadorna är. Detta kan innebära kompletterande provning. Sedan analyseras skadornas eventuella tillväxt under normala driftbetingelser. Möjligheterna till att göra sådana analyser är beroende av skadetyper.

För allmänkorrosion, oxidation, erosion och utmattning finns tillväxtlagar och empiriska samband. Precisionen i sådana är beroende på hur väl de kan anpassas för det aktuella fallet. Uppmärksamhet måste iakttas så de inte används felaktigt eller ger vilseledande resultat.

Gropfrätning är oftast oregelbunden och eventuella beräkningsprocedurer kan inte ge någon säker uppfattning om tillväxten. Fortsatt tillväxt kan föreligga, inte minst genom korrosionsutmattning, även om skadeorsakerna för den gropfrätning som uppstått elimineras.

För termisk utmattning och miljöinducerad sprickbildning finns det brottmekaniska koncept framtagna som direkt kan appliceras på panntuber (Dimmer 1989, Ellis 1999).

Eventuell krypskadeutveckling kan analyseras och beskrivs närmare i **avsnitt 2.1.5.3** där återstående livslängd hos tuber i överhettare behandlas.

Resultat av analyser på den förväntade återstående livslängden hos panntuber som har skadats ger villkor och beslutsunderlag för åtgärder. De lämpligaste åtgärderna är även beroende av strategier för drift och livslängd på pannan i det enskilda fallet.

Byte av panntuber i begränsad omfattning betyder vanligen relativt små insatser som även kan göras på kort varsel. Om utbredda skador föreligger kan, med hjälp av livslängdsanalyser, reparationer utföras vid tillfällen som ger den bästa planeringen och den högsta tillgängligheten. Det finns exempel på skador som normalt repareras som med stöd av livslängdsanalyser kan visas att inte vara nödvändiga att reparera.

Om skador inte föranleder akuta insatser så avgör precisionsnivån på de analyser som gjorts förutsättningarna för återkommande kontroller. Omfattning och intervall av de återkommande kontrollerna som bör utföras påverkar vägvalet av att byta panntuber då det inte är helt nödvändigt eller först då det förväntas vara nödvändigt.



Efter reparationsåtgärder är det väsentligt att övervaka att skadorna inte återkommer för att verifiera att skadeorsakerna är eliminerade.

Många pannor går utan större skadeproblem, dvs. förutsättning 2 ovan; och om sådana uppstått kan de ofta ha åtgärdats så att de inte har återkommit. Så länge val av bränslesammansättning, provning, underhållsåtgärder, driftsätt och processövervakning sker enligt god praxis förväntas vanligen inga betydande skador inom överskådlig tid.

Ju osäkrare övervakningen av pannan har varit desto större motiv finns det att göra en konditionsanalys av panntuberna om den återstående livslängden ska bedömas. Detta i syfte att finna eventuella oupptäckta skador. Ett program för en lämplig konditionsanalys kan upprättas med stöd av **avsnittet 2.1.4.2 Provning av panntuber**.

Om driftsättet av pannan ändras är det av intresse att veta huruvida panntubernas återstående livslängd kan påverkas. Det kan rekommenderas att i möjligaste mån identifiera eventuella effekter av de ändrade driftparametrarna och anpassa övervakningen till det nya driftsättet. Preventiva åtgärder för att skydda panntuber kan också vara aktuella. Även en konditionsanalys i samband med övergången till ett nytt driftsätt kan vara tillräddig som en referens då erfarenheterna av det nya driftsättet utvärderas.

#### REFERENSER

Bjurström H. 2001. Handbok i vattenkemi för energianläggningar, Värmeforsk.

Ellis F. V. & Tordonato S. 1999.

Failure analysis and life assessment for boiler tubes, PVP-Vol. 392, Service experience in fossil and nuclear power plants, ASME.

Eyckmans M., Verheyden K. & Gijbels S. 1999. Hydrogen damage in Belgian utility boilers, Proc. Int. Symp. Case histories on integrity and failures in industry, Milan, Italy, Sep 28th-Oct 1st, eds. V. Bicego, A. Nitta, J. W. H. Price & R. Viswanathan, pub. Engi-neering Materials Advisory Services LTD, UK.

Dimmer J.P., Lamping G. A and Jonas O. 1989. Boiler tube failure: Correction, Prevention and Control, research project RP1890-7, Final Report GS-6467, EPRI, Palo Alto, CA.

Persson L-Å & Stensson S-Å. 1999. Avställning/konservering av bland annat kraftvärmeanläggningar, Kraftvärme 99, SAQ seminarium 28-29 oktober, Karlstad.

Viswanathan R., Foulds J. R. & Roberts D. I. 1988. Methods for estimating the temperature of reheater and superheater tubes in fossil boilers, Proc. Int. Conf. Life assessment and extension part I, June 13 to 15, The Hague, The Netherlands, pp. 127-136.

### 2.1.5 Överhettare

#### Konstruktion

Ånga som skall användas till kraftalstring överhettas. Ju högre överhettningstemperaturen är desto större blir verkningsgraden. Denna temperatur begränsas av vad de använda materialen tål i den miljö överhettaren utsätts för. Överhettare består normalt av ett antal parallellkopplade rörslingor som är anslutna till ånglådor som samlar eller fördelar ångan. Slingorna placeras i rökgasstråket, ofta i konvektionsdelar och många pannor är utrustade med så kallade banker där överhettarna skyddas från strålning. Sådana överhettare kallas konvektionsöverhettare. De kan även placeras i eldstaden och kallas då strålningsöverhettare. I vissa konstruktioner utgör delar av tak och vägguber i pannan delar till överhettare. I moderna CFB-pannor placeras slutöverhettaren ofta i sandlås 2.1-3.

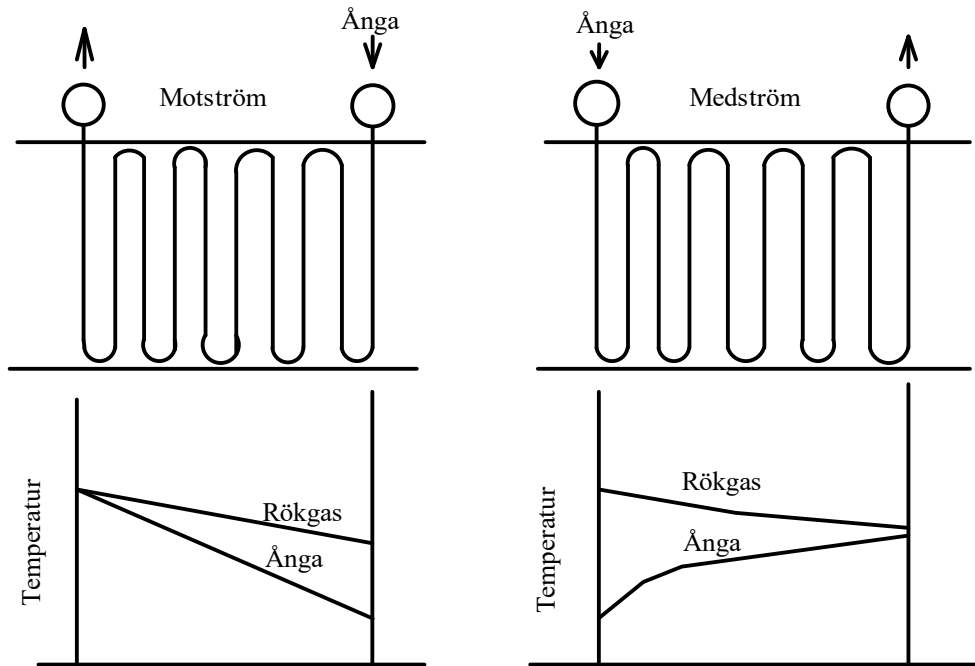
I horisontella gasstråk är den huvudsakliga slinglängden vertikal och överhettaren kallas då stående. Är rökgaskanalen vertikal har man liggande överhettare.

Sänks temperaturen på matarvattnet så måste bränslemängden ökas för att belastningen skall hållas konstant. Rökgasvolymen blir då större med högre ångtemperatur som följd.

För att kunna hålla den rätta temperaturen i överhettarna även om lasten varierar används reglerande ångkylare. Ångan kan kylas på flera sätt. En vanlig metod är att spruta in matarvatten i den överhettade ångan med en dysa. En annan vanlig typ av ångkylare är så kallade ytkylare där pannvattnet används som kylmedium. I kylaren leds den överhettade ångan genom tuber som omges av pannvatten, inget "främmande" vatten tillförs. Ångkylare beskrivs ytterligare i **avsnitt 2.1.10**.

För att säkerställa kylning av överhettaren, till exempel vid snabbstopp av turbinen, är åtminstone en säkerhetsventil placerad efter överhettaren.

Ångan i en överhettare kan gå antingen mot eller med rökgasens rörelseriktning, motström respektive medström. Vid motström blir både ång- och rökgastemperaturerna högst närmast eldstaden och lägst i den sista delen av överhettaren. Vid medström är rökgastemperaturen fortfarande lägst, men ångtemperaturen högst, i den sista delen av överhettaren. Vid medström blir i princip den högsta ångtemperaturen i överhettaren lägre än vid motström, se Figur 2.1-11.



Figur 2.1-11. Temperaturfördelning av rökgas och ånga längs överhettaren vid mot- och medström.

Figure 2.1-11. Temperature distribution of flue gas and steam in the superheater for steam directed against and along the flue gas direction.

Överhettningen av ångan sker vanligen i flera steg och kylningen sker mellan stegen. Överhettare inom varje steg benämns i ångans riktning som primära, sekundära och tertiära. Ångan överhettas i många pannor med mindre än tre steg och det finns sådana som har fler. Överhettarna är vanligen uppbyggda av skärmar där varje skärm utgörs av tubslingsor mellan fördelnings- och samlingslåda för överhettarsteget i fråga. Längs lådorna finns ett flertal skärmar fördelade. Den ordning som de olika stegen av överhettare möter rökgaserna kan variera beroende på dess placering i pannan. Överhettarnas placering i pannan kan variera mellan olika konstruktioner och följden av överhettarnas steg i ångans riktning är inte kopplade till följden av överhettarnas steg i rökgasernas riktning. Primäröverhettare är dock oftast de som möter rökgaserna sist. I anläggningar konstruerade för korrosiva bränslen undviks numera ofta att placera den sista (hetaste) överhettaren först, då detta ökar risken för korrosionsskador. Placering av denna överhettare i sandlåset hos CFB-pannor minskar korrosionsrisken radikalt.

Som framgår från Figur 2.1-10 är den ingående temperaturen på ångan i överhettaren lägre än den utgående. Vanligtvis är den utgående ångtemperaturen högre för varje steg.

Ånga från den sista överhettaren samlas upp i en samlingslåda och leds till turbinens högtrycksdel genom en huvudångledning. I större pannor är det vanligt att ånga samlas upp och leds till turbiner även från mellanliggande delar i överhettarsystemet. De är då utrustade med så kallade mellanöverhettare. Mellanöverhettaren är i ångans väg placerad efter tertiära överhettare (eller efter sekundära överhettare om tertiära inte finns). Placeringen i förhållande till andra överhettare och rökgasernas väg i pannan kan variera. Ånga från mellanöverhettare går genom så kallade varma

mellanöverhettade ångledningar fram till, och tillbaka från turbinens mellantrycksdelar. I vissa konstruktioner leds ånga dessutom fram till turbinens lågtrycksdelar och åter till mellanöverhettaren i så kallade kalla mellanöverhettade ångledningar.

Tubslingorna i överhettarpaket och -paneler är vanligen kallbockade. De hålls ihop och är upphängda med stag och stöd. Tubdimensionerna är, i likhet med panntuber, typiskt 30-80 mm i diameter och 3-8 mm i vägg tjocklek. De är dimensionerade med beräkningsvärden på kryphållfastheten och med ett korrosionstillägg. Toleranserna för vägg tjocklek och ovalitet är mindre än för panntuber.

Mediet i överhettartuber är vattenånga med högre temperaturer efter varje steg. Primärö-verhettaren är typiskt dimensionerad för utgående temperaturer mellan 400 och 500°C (beroende på materialval är det inte alltid kryphållfastheten som är dimensionerande under 480°C). Temperaturen efter sekundär- och tertiäröverhettare kan uppgå till 550°C. Nya kraftvärmepannor är i Sverige ofta dimensionerade för en utgående ångtemperatur från pannan på omkring 540°C. Utvecklingen strävar generellt mot högre ångtemperaturer. 540°C är ett typiskt värde för skogsflis för BFB. Det finns potential att öka temperaturen i en CFB till 560°C om tertiär överhettare är placerad i sandlåset.

Rökgasttemperaturerna varierar i pannan och är även beroende av konstruktionen. Överhettare är ofta placerade i olika delar av pannan med olika rökgasttemperaturer. Typiskt kan rökgasttemperaturen vara mellan 700 och 1000°C där överhettarna placeras. Överhettartuber utsätts alltså många gånger för lägre temperaturer än panntuber men metalltemperaturen på utsidan blir generellt avsevärt högre eftersom kylningseffekterna från den överhettade ångan inuti tuberna inte blir lika stora som med vattnet eller vattenångblandningen i panntuberna.

#### *Material*

Till överhettare används varmhållfasta material. Ju högre temperaturen är desto högre prestanda krävs. Materialet måste kunna motstå krypning, oxidation och korrosion i den aktuella miljön. Med de skillnader i temperatur och miljö som föreligger mellan olika typer av överhettare och pannor har låglegerade, martensitiska såväl som austenitiska stål och ibland nickelbaslegeringar användning till överhettartuber. Det är vanligt att materialvalet anpassas efter last och miljö och därför förekommer ofta flera olika överhettarmaterial i en och samma panna. I äldre konventionella pannor konstruerade för kol- eller oljeeldning är låglegerade stål vanligast. Sådana stål tål metalltemperaturer på tubens utsida på upp till ca 600°C med hänsyn till oxidation. Austenitiska stål har dock i flera länder sedan länge haft stor användning till överhettare med de högsta ångtemperaturerna, inte minst i Storbritannien och USA. Motsvarande temperatur för austenitiska högttemperaturstål är ca 750°C. Med de senaste 20 åren har martensitiska stål med 9-12 % krom blivit allt vanligare. De har oxidationsmotstånd upp till ca 650°C.

Pannor med bibränsleeldning kräver högre legerade material än de traditionella låglegerade stålen för att motstå högttemperaturkorrosion. Vid ångtemperaturer som är typiska för kraftvärmeverk är i många fall beprövade höglegerade material otillräckliga vid bibränsleeldning. I pannor med bibränsleeldning har därför högttemperaturmaterial som är nya för detta ändamål provats. Forskning på korrosionsmekanismer och rekommendationer rörande materialval till överhettare i

bio- och avfallsbränslepannor finns sammanställt i Värmeforskrappport 1174 (Aghili 2011) respektive 1188 (Stålenheim 2011).

Det har visat sig att korrosionsmekanismerna och under vilka förutsättningar korrosionen uppstår är komplexa. Många parametrar i pannans funktion i samband med bränsle och förbränning påverkar korrosionen och genom intensiv forskning har ökad förståelse uppnåtts för effekterna av olika parametrar. Det är dock fråga om komplexa mekanismer som ännu inte är helt kartlagda. Det finns exempel där ett material som visat gott korrosionsmotstånd i en anläggning korroderat oförväntat snabbt i en annan under till synes liknande förhållanden. Denna problematik belyses närmare i **avsnitt 2.1.5.1 Skador i överhettare** nedan.

Materialval till överhettare vid pannkonverteringar och nybyggen är således ofta osäkra så länge som man inte strikt håller sig till förfaranden vad gäller konstruktion, bränslen och driftsätt som erfarenhetsmässigt är problemfria.

I Tabell 2.1-3 ges en översikt av vanligt förekommande material för överhettare, samt exempel på sådana som provats i syfte att motstå överhettarkorrosion vid biobränsleeldning, med legeringsinnehåll och materialbeteckningar. Motsvarande svenska, europeiska, tyska, amerikanska och japanska beteckningar samt material som främst förknippas med varumärken anges i tabellen.

**Tabell 2.1-3** Legeringsinnehåll och materialbeteckning för stål i överhettartuber.

| Kategori          | Legering              | Svensk beteckning | EN beteckning  | Tysk beteckning | Amerikansk beteckning (A) / Japansk beteckning (J) / Varumärke (V) |            |
|-------------------|-----------------------|-------------------|----------------|-----------------|--------------------------------------------------------------------|------------|
| Låglegerade stål  | 1Cr -0,5Mo            | SS 2216           | 13CrMo4-5      | 13CrMo4 4       | T11                                                                | (A)        |
|                   | 2,25Cr-1Mo            | SS 2218           | 11CrMo9-10     | 10CrMo9 10      | T22                                                                | (A)        |
| 9-12% Cr-stål     | 9Cr-1Mo-0,2V-0,08Nb   |                   | X10CrMoVNb9-1  | X10CrMoVNb9 1   | T91                                                                | (A)        |
|                   | 9Cr-0,5Mo1,8W-V-Nb    |                   |                |                 | NF 616<br>T 92                                                     | (J)<br>(A) |
|                   | 12Cr -1Mo-0,5Ni- 0,3V |                   | X20CrMoNiV11-1 | X20CrMoV12 1    |                                                                    |            |
| Austenitiska stål | 18Cr-8Ni              | SS 2333           |                |                 | TP304H                                                             | (A)        |
|                   | 18Cr -10N-Ti          | SS 2337           |                |                 | TP321H                                                             | (A)        |
|                   | 18Cr-10Ni-Cb          |                   |                | 1.4550          | TP347H                                                             | (A)        |

| Kategori | Legering                          | Svensk<br>beteckning | EN<br>beteckning | Tysk<br>beteckning | Amerikansk<br>beteckning (A)<br>/ Japansk<br>beteckning (J) /<br>Varumärke (V) |
|----------|-----------------------------------|----------------------|------------------|--------------------|--------------------------------------------------------------------------------|
|          | 16Cr-12Ni-<br>2Mo                 | SS 2343              |                  | X7CrNiMoN17 13     | TP316H (A)                                                                     |
|          | 15Cr-10Ni-<br>1Mo-1Nb-6Mn-<br>V-B |                      |                  |                    | Esshete 1250<br>(V)                                                            |
|          | 24Cr-20Ni                         | SS 2361              |                  |                    | TP310H (A)                                                                     |
|          | 25Cr-20NiNbN                      |                      |                  |                    | HR3C (J)                                                                       |
|          | 27Cr-32Ni-Nb-<br>Ce               |                      |                  | X7NiCrCeNb32<br>27 | AC 66 (V)                                                                      |
| Ni-bas   | 21Cr-63Ni-<br>9Mo-Ti-Al-Nb-<br>Ta |                      |                  |                    | Sanicro 63<br>(V)<br>Inconel 625<br>V)                                         |

#### 2.1.5.1 Skador i överhettare

Skador i överhettare är mycket vanligt förekommande och havererade överhettartuber är enligt EPRI den främsta orsaken till nedsatt tillgänglighet i kraftvärmeverk (Dimmer 1989). I jämförelse med panntuber är påkänningarna generellt sett större. De utsätts för högre ångtemperaturer som innebär att högtemperaturkorrosion, oxidation och krypning i hög grad blir livslängdsbegränsande faktorer.

Samma indelning som i kapitlet för panntuber kan göras för att klargöra under vilka förutsättningar som skador kan börja uppstå:

- Normal drift av panna.
- Drift av panna med störningar.
- Drift av panna med modifieringar i konstruktionen.
- Drift av panna med ändring eller variation av bränslen och förbränning.

I kapitlet för panntuber ges generella kommentarer till denna indelning som gäller även för överhettare, se 2.1.4.1 Skador i panntuber. En skillnad är dock att man i överhettare i högre grad kan förvänta sig en skadeutveckling under normal drift. Effekterna av olika skademekanismer beskrivs i det följande med hänsyn till indelningen ovan.

#### Korrosion

Överhettare är drabbade av högtemperaturkorrosion och detta gäller särskilt pannor eldade med biobränslen och pannor med avfallsförbränning. I biobränsleeldade pannor

har i många fall kraftiga korrosionsangrepp uppstått efter en kort tid efter drift-sättning.

Faktorer av stor betydelse som orsakar förödande korrosion i överhettare är:

- Alikaliföreningar i smält form
- Stråkbildning
- Reducerande förhållanden

Biobränsle- och avfallseldning innebär stor känslighet för alla dessa faktorer och förståelsen för dess inverkan och inverkan av många andra möjliga faktorer är till vissa delar begränsade, t.ex. när det gäller hur olika faktorer kan samverka med varandra. Intensiv forskning pågår sedan flera år i landet för att få förståelse för hur korrosionen kan undvikas och att finna lämpliga sätt att göra detta med tanke på de ångdata som krävs.

#### Alikaliföreningar i smält form

Förbränningsprodukter av fossila bränslen bildar beläggningar och avlagringar på tuberna i överhettare. Med beläggningar avses en fast fas såsom aska och angriper generellt inte det skyddande oxidskiktet på tuben (skyddande oxidskikt beskrivs närmare i **avsnitt 2.1.4 Panntuber**).

Avlagringar som främst uppstår vid de temperaturer som förekommer på överhettarnas yttertytor är uppbyggda av smält fas och fast fas till varierande delar. De smälta faserna i avlagringen är till sammansättning och andel beroende av faktorer som till exempel bränslets innehåll, förbränning, temperatur och typ av värmeöverföring. Generellt angriper och löser de smälta faserna kontinuerligt upp de skyddande oxidskikten. Vid biobränsle- och avfallseldning har förhållandena ofta varit sådana att smältor av alikaliföreningar har bildats som är mycket korrosiva. De mekanismer som styr bildning av sådana smältor är komplexa och inte helt klarlagda. Det är i alla fall konstaterat att smältor som bildas ofta är förknippade med anrikningsmekanismer.

Korrosiva ämnen i rökgasen anrikas i smältöarna som väter tubytan. Detta innebär att det inte går att undvika korrosionen genom att hålla nere halterna av till exempel klor och kalium. Smältor och följaktligen korrosion kan uppstå även vid låga halter och det är i praktiken inte möjligt att helt avlägsna de korrosiva ämnena.

En metod som har visats vara framgångsrik för att minska korrosionen är att tillföra svavel. Svavel sulfatiserar kaliumklorider men finns i biobränslen inte alltid i tillräckligt stora mängder för detta. Svavlet kan då tillföras genom att blanda in svavelrika bränslen som torv eller genom svaveladditiv. Höga halter av svavel kan orsaka korrosion i sig. Det skulle i alla fall medföra beskedligare korrosionshastigheter jämfört med saltsmältakorrosion.

Vid avfallsförbränning innehåller dock bränslet alltid relativt höga kloridhalter. Betydande innehåll av bly och zink är vanligt. Det medför att alkalialter med låga smältpunkter bildas. Av denna anledning är ångtemperaturen avfallsförbränningsanläggningar typiskt begränsad till högst 450 °C.

De korrosionsskador som uppstår består vanligen av gropfrätning eller fläckvisa korrosionsangrepp. I austenitiska stål har korngränsfrätning och intern korrosion observerats. Grunder för högtemperaturkorrosion beskrivs i **avsnitt 1.5.3.2.9** i kapitlet om skademekanismer.



### Stråkbildning

Med stråkbildning avses det fenomen som uppkommer då omblandningen av förbränningsluft, bränsle och brännbara gaser är otillräcklig och termiken får avgöra vilken väg som de i den nedre delen av eldstaden genererade gaserna tar. Luften och gaserna stiger uppåt i enskilda stråk och blandas endast långsamt. Resultatet blir ett utdraget förbränningsförlopp och ojämn temperaturfördelning. Detta resulterar i sin tur i att reducerande förhållanden uppstår. Stråkbildningen kan dessutom variera i tiden så att en given del av överhettaren omväxlande utsätts för en reducerande eller oxiderande omgivning. Både biobränslen och avfall eldas under former som ger benägenhet till stråkbildning. Både förhöjda temperaturer och reducerande förhållanden ökar korrosionen.

### Reducerande förhållanden

Som nämnts ovan uppstår reducerande förhållanden vid stråkbildning och reducerande förhållanden ökar korrosionen. I **avsnitt 2.1.4** beskrivs andra orsaker till att reducerande miljöer uppstår och överhettare kan vara placerade i sådana miljöer. Ett exempel är förbränning i svävbädd. Korrosion i reducerande miljö behandlas även i **avsnitt 1.5.3.2.9**.

Det som enligt punkt a) kan betraktas som normal drift av panna kan alltså med de pannkonstruktioner som använts till nya typer av bränslen såsom biobränslen och avfall resultera i omfattande korrosion på överhettare. Denna korrosion visar stora variationer i var de uppträder och korrosionsorsakerna är skiftande. Det finns som ovan nämnts många faktorer som inverkar. I princip är det rökgasernas sammansättning och temperatur då de träffar överhettaren som är avgörande. Dessa varierar för olika pann typer men det finns också viktiga karaktäristiska egenskaper som inverkar och som inte behöver vara kopplade till de olika pann typerna, till exempel:

- Konstruktion
- Överhettarplacering
- Förbränningstemperatur

En utförlig sammanställning av överhettarkorrosion i bioeldade anläggningar ges i Värmeforskrappport 700 och 1174 (Henderson 2000 och Stålenheim 2011). I bilaga 5 till Värmeforskrappport 607 (Nordin 1997) beskrivs korrosionsproblem vid avfallsförbränning närmare.

a) Överhettare är känsliga för korrosion även i pannor som eldas med konventionella bränslen. De metalltemperaturer som normalt föreligger på överhettartubernas utsida är till stora delar så höga att endast små avvikelser från normalt och beprövat driftsätt kan ge ökade korrosionshastigheter.

Liksom för pann tuber skulle det kunna förutsättas att ett normalt driftsätt endast resulterar i en relativt långsam oxidtillväxt. Materialvalet är avpassat efter de ångdata överhettaren har. Oxidtillväxten vid aktuell temperatur för aktuellt material avgör lämpliga intervall för eventuella rengöringar och om man kan förvänta sig att oxidation av överhettartubernas utsida efter en längre tid kan bli kritisk. Med tillgång till drift- och konstruktionsdata är det möjligt att göra beräkningar för att indikera tubytans metalltemperatur. Den termiska belastningen är större på överhettartubernas vindsida än på läsidan och temperaturen bör mätas för att kunna göra en riktig bedömning av oxidtillväxten. Utöver att oxidationen efter långa drifttider kan reducera

godstjockleken till kritiska nivåer så får tjockare oxidskal lättare sprickor som kan ge upphov till korrosionsangrepp.

Insidig oxidation kan bli kritisk i överhettartuber. Detta gäller utöver de låglegerade stålen även martensitiska och i någon utsträckning austenitiska stål efter långa drifttider. Studier av sådana material visar att för 9 % Cr stål kan kritiska tjocklekar uppnås avsevärt tidigare än då den dimensionerade livslängden uppnåtts redan vid konventionella designtemperaturer (Husemann 1999).

b) I alla anläggningar är störningar som leder till förhöjd metalltemperatur på överhettaren skadliga. Det kan räcka med en temperaturhöjning i storleksordningen 10°C för att korrosion ska uppstå. Obalanser och snedbelastningar i driften är vanligt förekommande och det är därför tillrådligt att med tillgängliga medel övervaka driften så att onormala temperaturvariationer kan indikeras.

Avlagringar uppstår lätt på överhettare i pannans konvektionsdelar. I många pannor uppstår avlagringar i kontrollerbar utsträckning under normal drift. Vid driftstörningar kan de bli alltför omfattande så att värmeöverföringen minskar med risk för förhöjda metalltemperaturer i tuberna och minskad verkningsgrad i pannan. Dessutom finns det risk för igensättningar och korrosionsrisken ökar med tjockare avlagringar. Problem med avlagringar kan till exempel uppstå vid:

- störningar i förbränning;
- störningar av sotblåsning;
- störningar i pannans last;
- störningar i hastighets- och temperaturfördelning

Utförlig beskrivning om avlagringsfenomen (fouling) återfinns i Värmeforskrapport 607 (Nordin 1997).

Ett annat exempel på korrosionsskador som kan uppstå i samband med avvikelser från normala driftbetingelser är insidig gropfrätning. Detta uppstår företrädesvis om syrehalten i pannvattnet är för högt. I överhettartuber kan ansamlingar av kondensat i böjar orsaka gropfrätning. Det kan även uppstå i horisontella tuber vid luftexponering i samband med stopp.

c) Modifiering av pannans konstruktion kan innebära förändringar av parametrar som har inverkan på korrosionsbildning så att sådan uppstår. Likadant är det med avlagringar och beläggningar. Korrosionsproblem i överhettare är omfattande och i många fall inte lösta. För att kunna förutse riskerna för korrosion och anpassa utförandet efter detta är det därför nödvändigt att kunna tillgodogöra sig de erfarenheter som finns. Detta gäller små modifieringar och konstruktiva åtgärder av skador som uppstått såväl som större ombyggnationer som till exempel vid konvertering till andra bränslen.

d) Ändring och variation av bränslen är en betydande orsak till korrosionsbildning. Vid kol- och torveldning är svavel och klorhalterna kritiska. Halterna bör analyseras och kontrolleras. Inköp av låga kvaliteter bör undvikas. Den typiska korrosion som uppstår vid för höga svavel och klorhalter orsakas av korrosiva alikalijärn-trisulfater som börjar bildas i askavlagringarna på tuberna vid temperaturer kring 590°C. Korrosionen orsakar godsfortunning och uppstår i överhettarnas varmaste delar. Största godsavverkningen sker vid gränserna mellan delar av tuberna som är betäckta och obetäckta av aska.

Likadana skador uppstår vid oljeförbränning som en följd av innehåll av vanadin och natriumklorid i oljan som bildar korrosiva föreningar.

Biobränslen kan vara av olika ursprung som till exempel åkergrödor, halm, flis, sågspån, bark, grot, salix och stamved. De olika typerna av biobränslen uppvisar olika förbränningskaraktäristik med stora variationer i askinnehåll, stora variationer i innehåll av Si, Ca, K, Na, S, och Cl vilket ger stora skillnader i askegenskaper. Askegenskaperna har en stor betydelse för korrosionsbildning. Det är vanligt att blanda olika typer av biobränsle i syfte att reducera korrosiviteten. Värmeforsks bränslehandbok (Olsson 2012) redogör i detalj för biobränslets egenskaper.

#### *Spänningskorrosion*

Överhettartuber kan få spänningskorrosionssprickning om exponering av klorider, sulfater eller hydroxider tillsammans med höga spänningsnivåer förekommer. De korrosiva ämnena kan bli införda genom matarvattnet eller genom kylvattensinjektioner. Utsidiga beläggningar och avlagringar kan också innehålla sådana ämnen. Sprickningen kan därför vara både invändig och utvändig, invändig sprickning är vanligast. Sprickorna förekommer företrädesvis vid positioner med förhöjda driftinducerade spänningar och där det finns egenspanningar från tillverkningen. Typiska positioner är på böjar där flödesstörningar förekommer och de korrosiva ämnena kan ansamlas sig samt vid svetsade stag. Insidig spänningskorrosionssprickning kan vara förknippat med störningar eller brister i kvaliteten på matar- eller kylvatten. Utsidiga sprickor av denna typ är inte vanliga. Ändringar i driftförhållanden kan gynna benägenheten för att sprickorna uppstår.

#### *Erosion*

- a) Erosion orsakas av strömmande partiklar i rökgaserna. Det finns pannkonstruktioner med erosionsproblem under normala driftförhållanden. Generellt är pann typer där sand ingår i förbränningsprocessen känsligare för skador.
- b) Erosionsskador är förknippade med ojämnt eller förhöjt flöde av rökgaser som driver en stor volym av partiklar mot tubytan. Exempel på störningar som kan orsaka skador i överhettare:
  - Rökgaserna leds inte korrekt av den utrustning som är avsedd för detta.
  - Beläggningar och avlagringar har uppstått som försvårar eller stoppar gasflödet. Flödet får då högre hastigheter genom andra passager.
  - Luft- eller gasflöden överskrider de som konstruktionen är avsedd för.
  - Fel i sotblåsningssystemet.
- c) Modifieringar av pannan kan ge upphov till turbulenta strömningar och förutsättningarna för att erosionskador kan öka.
- d) Ändringar av bränslen och förbränning kan ge ett ökat askinnehåll i rökgaserna så att erosion uppstår. Beläggningar och avlagringar kan även uppstå vilket i sin tur kan ändra strömningsbilden och orsaka erosion.

Erosionskadorna är ofta lokala med fläckvis godsförtunning. De eroderade ytorna är ofta rent metalliska med ett polerat utseende.

### Utmattning

Olika typer av förekommande utmattning i överhettare är:

- Termisk utmattning
- Korrosionsutmattning
- Vibrationsutmattning

I överhettare är termisk utmattning förekommande vid tubgenomföringar i ånglådor, se **avsnitt 2.1.3**.

I genomströmningsspannor kan snabba temperaturväxlingar förekomma i de primära överhettarna som leder till termisk utmattning. Övrig termisk utmattning och vibrationsutmattning som förekommer i överhettare är snarlik den som förekommer i panntuber, se **avsnitt 2.1.4**. Insidiga korrosionsutmattningssprickor är ovanliga i överhettartuber. Propagering från utsidan kan förekomma i svetsar vid anslutningar till ånglådor och stag. Skadorna har kunnat korreleras till cyklisk drift av pannan (Dimmer 1989).

- a) Om normala driftförhållanden omfattar cyklisk drift av pannan ökar risken för att det med tiden uppstår kryputmattningssprickor i blandsvetsar. Skillnad i termisk utvidgningskoefficient mellan olika material är grunden till att sprickorna bildas och denna skillnad är relativt stor mellan till exempel ferritiska och austenitiska material. De totala påkänningarna avgör svetsarnas livslängd och består av inre övertryck, tubens dödvikt, termisk gradient genom tubvägg och inspänningar som förhindrar termisk expansion. Sprickorna är runtgående och uppträder i fallet av svetsar mellan ferritiska och austenitiska material vid smältgränsen i det ferritiska materialet.

### Överhettning

- a) Tillfälliga överhettning kan inte förväntas uppstå under normala driftförhållanden.
- b) Störningar som orsakar överhettningar kan vara att tuber sätts igen av främmande substans, beläggningar eller kondensat eller att en läcka har uppstått. Andra orsaker är för lågt ångflöde, för låg last i pannan eller för stor värmeöverföring vid felaktig förbränning (Viswanathan 1989).

Vid en överhettning degenereras mikrostrukturen, tuben deformeras, godset förtunnas och går slutligen till brott. Tiden till brott är snabb och beror på hur stor överhettningen är. Brottets utseende beror också på hur stor överhettningen är och utseendet är dessutom materialberoende. Vid tubbrott eller deformationer orsakat av överhettning är det i många fall osäkert hur stort område omkring brottet eller deformationerna som har fått materialskador.

- c-d) Med utnyttjande av de kunskaper som finns bör överhettning som en följd av modifieringar av pannan eller ändringar av bränslen och förbränning kunna undvikas.

### Krypning

- a) Överhettare är vanligen dimensionerade mot en viss kryplivslängd och vid normal drift kan man förvänta sig att krypskador uppstår med tiden. Vid krypdimensionering används säkerhetsfaktorer och för överhettartuber används också

ett betydande korrosionstillägg. I en väl fungerande panna kan därför en väsentlig del av överhettarnas kryplivslängd återstå då den vid dimensioneringen använda tiden till krypbrott, till exempel 100 000 timmar, uppnåts.

- b) Krypbrott i överhettare orsakas många gånger av relativt små kontinuerliga övertemperaturer i materialet eller av att materialet har degenererats av tidigare tillfälliga överhettningar. Det finns också fall av mindre lyckade materialval som orsakat krypskador i överhettare.

De vanligaste positionerna för krypskador är i) i områden strax innan byte till ett material med högre kryphållfasthet, ii) strax innan den sista samlingslådan för ångans utlopp från pannan där ångtemperaturen är som högst och iii) där strålningsvärme kan resultera i höga metalltemperaturer.

En annan orsak till krypskada är att tubernas väggar reducerats av andra skademekanismer. Driftpåkänningarna ger då högre spänningar i materialet och krypningen ökar. Krypbrott föregås oftast av betydligt mindre deformationer i jämförelse med de snabbare brott som uppstår vid större överhettningar.

Krypskador behandlas närmare i **avsnitt 1.5.2 Krypning**.

- c-d) Modifieringar av pannan eller förändringar av bränslen eller förbränning kan leda till förhöjda metalltemperaturer i överhettarna som ökar krypningen. Skadeeffekter av ökad krypning på grund av måttligt förhöjda temperaturer i överhettarna uppträder vanligtvis först efter längre tider och överskuggas i sådana fall inte sällan av andra skademekanismer, t.ex. att överhettarna börjar korrodera.

#### 2.1.5.2 Provnings av överhettare

Det kan finnas olika primära syften med provning av överhettare:

- i) kontroll av att tillverkningsfel inte uppstått vid modifieringar och ombyggnader samt reparationer av överhettare;
- ii) kontroll av att driftinducerade skador inte har uppstått;
- iii) undersökning av utbredning och orsak då en skada upptäckts

För punkt i) är det viktigt att utförda svetsarbeten provas på bästa sätt. MT, UT, och RT i lämplig kombination är relevant provning, se vidare i **avsnitten 1.6.1, 1.6.3** respektive **1.6.7**. Det är även viktigt att genom kontroller försäkra sig om att nyinsatta material inte har materialdefekter eller att reservmaterial inte har skadats under lagring. Vid byten av hela paneler och tubpaket är det viktigt att kontrollera att stag, upphängningar och infästningar är riktigt utförda och att dessutom dokumentera utförandet.

Visuell provning (VT) av överhettare ger i första hand en uppfattning om förekomst av beläggningar och avlagringar samt bilden av eventuella ansamlingar av dessa. Vissa korrosions- och erosionsskador samt indikationer på kraftiga överhettningar kan upptäckas. Möjligheterna till att utföra VT är inte sällan begränsade på grund av utrymmet för och placeringen av överhettaren. Det kan rekommenderas att dokumentera i vilken grad olika delar av överhettaren går att avsyna om sådana begränsningar finns.

I VT ingår även kontroll av upphängningsanordningar och uppmätning av eventuella förskjutningar.

Resultatet av den visuella provningen avgör vilka fortsatta insatser som bör göras med OFP. I det följande beskrivs hur olika OFP-metoder kan användas för att finna skador såsom:

- godsförtunning
- läckor
- sprickor
- svetsdefekter
- materialdefekter
- överhettat material
- krypskador

#### *Godsförtunning*

Metoderna för att mäta godstjocklekar på överhettartuber är lika de som används för panntuber och beskrivs i **avsnitt 2.1.4.2**. Åtkomligheten för skanning av tubtjocklek är dock mer begränsad än för panelväggar. Beläggningar och avlagringar är vanligt förekommande och det är i många fall av intresse att mäta deras tjocklek med skikt-tjockleksmätare som komplement till mätningen av godstjockleken. Sådana instrument är främst avsedda för skalliknande skikt och beskrivs närmare i **avsnitt 1.6.5**.

Utöver korrosion och erosion, som är de vanligaste orsakerna till godsförtunning i panntuber, provas överhettartuber med avseende på oxidation och vissa fall av överhettning.

Omfattande avlagringar och åtkomlighet kan utgöra praktiska problem vid provningen. Avlagringarna kan ha oregelbunden tjocklek och vara besvärliga att avlägsna. Borstning och sandblästring är exempel på metoder som används för att avlägsna avlagringar innan godstjockleksmätning. I många fall döljer sig korrosionsskador under avlagringar på ett oregelbundet sätt. Säkerheten i provresultaten är alltid relaterad till provningens omfattning och noggrannhet.

#### *Läckor*

Provtryckning används vanligtvis för att säkra att det inte finns läckor.

#### *Sprickor*

Spricksökning är generellt förknippat med att identifiera kritiska positioner där de kan förekomma och att prova med relevanta metoder för den eller de typer av sprickor man letar efter. Exempel på kritiska positioner för olika typer av sprickor i överhettare ges i **avsnittet 2.1.5.1** ovan.

De spricksökningsmetoder för sprickor som beskrivs i **avsnitt 2.1.4.2** om panntuber och som även förekommer i överhettare har i princip samma tillämpning. I överhettare är dock austenitiska material inte ovanliga och till sådana kan MT inte användas. PT har användning men tillförlitligheten kan vara liten eftersom PT inte indikerar oxidfyllda sprickor. Austenitiska material oxiderar långsamt men åtminstone fina sprickor kan vara oxidfyllda. Denna begränsning gäller även austenitiska delar av blandsvets-skarvar mellan ferritiska och austenitiska material. RT har tillämpning på sådana blandskarvar men metoden har liten känslighet för ytliga fel. UT har stora begränsningar för spricksökning hos överhettartuber eftersom godstjockleken i regel är för tunn. Det är först vid ca 8 mm vägg-tjocklek som UT fungerar tillfredsställande för spricksökning.

Olika typer av sprickor fordrar ofta olika provningsteknik för att kunna indikeras vid tillämpning av en OFP-metod. Om detta står att läsa i kapitel 1.6 'Oförstörande provning'.

Det resonemang om detekteringsgränser av sprickor som förs i **avsnitt 2.1.4.2** om panntuber gäller även för överhettartuber.

Då sprickor eller defekter påträffas bör de karaktäriseras. Ett tubprov är alltid att fördra för detta ändamål. I fall av utbredda indikationer kan replikprovning utgöra ett komplement till tubprovet.

#### *Svetsdefekter*

För att hitta svetsdefekter tillämpas i princip samma metoder som för detektering av sprickor: MT och UT samt eventuellt PT och RT. Tekniken måste anpassas till de förutsättningar som gäller för att finna olika typer av svetsdefekter, se **avsnitten 1.6.1 och 1.6.3** respektive **1.6.2** och **1.6.7**.

#### *Materialdefekter*

Materialdefekter kontrolleras i första hand vid kvalitetskontrollen. Om förekomst av materialdefekter bör undersökas av speciella skäl efter att anläggningen har tagits i drift så finns det möjligheter att med rimliga insatser göra detta med hjälp av virvelströmsbaserade metoder beskrivna i **avsnitt 2.1.4.2**. Karaktärisering av defekterna sker enligt samma principer som för sprickor ovan. Åtkomligheten för sådan provning kan dock vara begränsad i överhettare

#### *Överhettat material*

Överhettade partier kan indikeras vid VT av att skalning eller korrosionsangrepp har uppstått. Vid kraftiga överhettningar sväller tuberna på grund av att sträckgränsen reduceras eller på grund av snabba krypdeformationer. Speciella mekaniska mätinstrument finns utformade för att mäta upp eventuella måttavvikelser på grund av svällning. En diameteravvikelse på 5 % eller mer indikerar en kraftigare överhettning. Överhettningar är emellertid ofta så stora att materialet deformeras så snabbt att tubbrott hinner ske innan man hinner sätta in några kontroller. Det inre övertrycket orsakar de största spänningarna i omkretsled vilket resulterar i axiella uppfläckningar vid tubbrott.

Vid överhettningar kan materialet degenereras även om sprickor och svällningar inte uppstår. Dels kan mikroskopiska förstadier till krypsprickor i form av krypkaviteter och mikrosprickor bildas och dels kan mikrostrukturen omvandlas eller förgrovas så att hållfastheten väsentligt reduceras. I syfte att undersöka materialeffekter av överhettningar tillämpas replikprovning och hårdhetsprovning (**avsnitt 1.6.4** respektive **1.6.7**). Det säkraste sättet att avgöra omfattningen av en överhettning är att använda sig av en kombination av de två metoderna där även områden som inte befaras vara överhettade provas som referens. I syfte att karaktärisera överhettningen tillämpas även uttag av tubprover vilket beskrivs i avsnitt 2.1.4.2 panntuber.

#### *Krypskador*

Krypsprickor bildas från utsidan och så länge som det inte rör sig om austenitiska material används MT. Det inre övertrycket orsakar de största spänningarna i omkretsled vilket resulterar i sprickor i axiell led. Överhettare är dock tunnväggiga och risken



är stor att krypsprickor uppstår och går till genomgående brott inom tiden mellan två inspektioner.

Om krypskador befaras, till exempel på grund av förhöjda krypspänningar eller långa drifttider, kan detta undersökas med replikprovning, se **avsnitt 1.6.6**. Områden med godsfortunningar och delar med de högsta metalltemperaturerna är kritiska. Ofta är situationen sådan att områden som kan vara kritiska är omfattande eller svåra att identifiera. Samtidigt kan krypskadorna uppträda lokalt. Den omfattning som krävs för att provningen inte ska riskera att bli missvisande kan därför bli stor. De positioner som bedöms vara mest kritiska kan också vara svåråtkomliga för replikprovning. Replikprovning har därför begränsad användning för överhettartuber.

För att få indikation på om krypskador kan förväntas uppstå kan metalltemperaturen på överhettarna övervakas med hjälp av strategiskt placerade termoelement. Det är dock inte i alla pannmiljöer som man lyckas få termoelementen att fungera tillförlitligt i någon längre tid.

Mätning av godstjocklekar rekommenderas så att inte bedömningar av den återstående kryplivslängden baseras på lägre spänningar än de verkliga.

#### *Beläggningar och avlagringar*

Undersökning av beläggningar och avlagringar sker efter samma principer som för panntuber, se **avsnitt 2.1.4.2**. Utöver principen att tubprover bör tas ut från de varmaste områdena så får andra lämpliga positioner avgöras från fall till fall beroende på beläggningarnas utseende och omfattning.

#### *Förstörande provning för analys av skador*

Förstörande provning för analys av skador i överhettare skiljer sig i princip inte från det som beskrivs om panntuber i **avsnitt 2.1.4.2**. I överhettare kan det dessutom vara befogat att utföra varmdragprovning och krypprovning på tubprover. Provningsmetoderna beskrivs i **avsnitt 1.7.4** respektive **1.7.7**. De är de i särklass säkraste sätten att avgöra om materialets hållfasthet är tillräcklig för fortsatt drift och vad gäller krypprovning **respektive** för att bedöma den återstående kryplivslängden.

#### *2.1.5.3 Återstående livslängd hos överhettare*

Undersökningar av den återstående livslängden kan utföras utifrån följande två situationer:

1. Skador upptäcks och den primära frågan är om det finns någon återstående livslängd.
2. Planering, tillgänglighet och säkerhet av pannans fortsatta drift föranleder att få kännedom om överhettarnas kondition och återstående livslängd.

I den första situationen är det nödvändigt att finna orsaker till skadan. Materialundersökningar av olika slag är grundläggande för detta. Skador är i många fall orsakade av att mekaniska eller processtekniska fel har uppstått. Medvetet ändrade driftförhållanden orsakar också ofta skador. Om skadorna och orsakerna till dessa granskas kan det leda till att återkommande skadebildning kan förhindras.

En bedömning av i vilken omfattning reparationer bör ske består först i att undersöka hur utbredda skadorna är genom OFP. Sedan analyseras förväntad skadeutveckling där de aktuella driftbetingelserna beaktas. Om avvikelser från normala driftbetingelser

har orsakat skadan kan den förväntade skadeutvecklingen med fördel analyseras både för de normala och för de onormala betingelserna. Detta kan underlätta avgörandet av lämpliga åtgärder. Möjligheter till sådana analyser är beroende av skadetyp och precisionen påverkas av till exempel information om drifthistorik och omfattning av tidigare provning.

Följande punkter kan vara värda att uppmärksamma:

- För allmänkorrosion, oxidation och erosion finns tillväxtlagar och empiriska samband (Viswanathan 1995). Precisionen i sådana är beroende på hur väl de kan anpassas för det aktuella fallet. Uppmärksamhet måste iakttas så de inte används felaktigt eller ger vilseledande resultat.  
Högtemperaturkorrosion kan vara så allvarlig att hela överhettare måste bytas ut. Analys av skadeorsak är väsentlig för att på bästa sätt justera driftförhållanden och materialval i ersättande överhettare så att skadorna inte återkommer eller åtminstone minskar. Eventuella åtgärder som minskar pannans prestanda, som till exempel en sänkning av ångtemperaturen, för att komma tillrätta med skadorna får vägas mot acceptabel livslängd.
- Vid byten kan det behövas tid till att införskaffa en ny överhettare. Ofta är det ovisst om det är möjligt att fortsätta driften tills dess. Ett gediget provningsunderlag ger goda förutsättningar för att avgöra om och hur länge fortsatt drift kan ske utan risk för haverier med eller utan provisoriska reparationer.
- I fall där det kan konstateras att skadorna inte är så omfattande utgör provningsunderlag och analyser grund för beslut om det är värt att fortsätta att använda överhettaren. Fortsatt användning är förknippat med åtgärder för att hindra skadebildningen och uppföljande provning för att övervaka detta.
- För termisk utmattning och korrosionsutmattning finns det brottmekaniska koncept framtagna som direkt kan appliceras på överhettartuber (Dimmer 1989, Ellis 1999).
- Vid överhettningar avgörs omfattningen och hur mycket hållfastheten kan ha reducerats med hjälp av den provning som beskrivs i **avsnittet 2.1.5.2** ovan. Detta utgör underlag till bedömning av den återstående livslängden och för att bestämma omfattning samt tidsramar för eventuella reparationer eller byten av överhettare.
- Resultat av analyser på den förväntade återstående livslängden på överhettare som skadats ger villkor och beslutsunderlag för åtgärder. De lämpligaste åtgärderna är beroende av strategier för drift och livslängd på pannan i det enskilda fallet.
- Byte av överhettartuber i begränsad omfattning kan innebära relativt små insatser som även kan göras på kort varsel. Om utbredda skador föreligger kan, med hjälp av livslängdsanalyser, byten av överhettare planeras in vid tillfällen som ger den högsta tillgängligheten.
- Om skador inte föranleder akuta insatser så avgör precisionsnivån på de analyser som gjorts förutsättningarna för återkommande kontroller. Omfattning och intervall av de återkommande kontrollerna som bör utföras påverkar vägvalet av att byta överhettare då det inte är helt nödvändigt eller först då det förväntas vara nödvändigt.
- Efter reparationsåtgärder är det väsentligt att övervaka att skadorna inte återkommer för att verifiera att skadeorsakerna är eliminerade.

I den andra situationen då livslängdsanalysen främst är avsedd för längre perspektiv bör följande parametrar användas på ett interaktivt sätt:

- i) drifthistorik;
- ii) prognoser i driftförhållanden;
- iii) beräkningar;
- iv) oförstörande provning och
- v) förstörande provning

Till exempel kan drifthistoriken påverka valet av provpositioner för metallografiska metoder vars resultat kan förfinas beräkningar på den återstående kryplivslängden. De degraderingsmekanismer som beaktas är krypning, korrosion, erosion och utmattnings. Tillväxtlagarna för korrosion och erosion som tillämpas är vanligen linjära och förutsätter angrepp av allmän karaktär.

Kännedom om materialets metalltemperatur är väsentlig. Termoelement kan tillämpas. I USA är mätning av insidiga oxidskikt med ultraljud en etablerad metod. Tillväxten extrapoleras linjärt och korrelationer för oxidtjocklekens inverkan på metalltemperaturen utnyttjas (Viswanathan 1995).

En konditionsanalys genomförs som underlag till livslängdsanalysen. Den omfattar typiskt godstjockleksmätningar, replikprovning, hårdhetsprovning och tubprover för metallografisk undersökning och krypprovning.

Spänningsanalyser utförs på aktuella tubgeometrier där hänsyn tas till godsfortuning. Med framräknade ekvivalenta spänningar kan livslängder extrapoleras med hjälp av krypprovresultat. För periodvisa ändringar av driftdata används delskaderegler. Metoder för återstående livslängdsbedömningar av överhettartuber finns beskrivet av Viswanathan (Viswanathan 1995).

Även om till synes ganska exakta värden på återstående livslängd kan tas fram med metoderna ovan och även om de i många fall visat sig ha stor träffsäkerhet så bör eventuella osäkerheter i förfarandet för det aktuella fallet uppmärksammas så att resultaten håller sig konservativa. Med resultaten kan oplanerade stopp på grund av tubbrott undvikas, lämpligt tidsintervall till nästa inspektion bestämmas och det kan bedömas hur lång återstående livslängd som kan förväntas.

I många bio- och avfallsförbränningsanläggningar används korrosivt bränsle och där bränslekvaliteten ofta ändras. Det gör det svårt att bedöma återstående livslängd med någon större precision, dels för att det kan vara svårt att fastställa status pga. godsfortuning och dels för att man inte vet vilket bränsle eller vilken bränsleblandning som kommer att användas i framtiden.

## REFERENSER

- Dimmer J.P., Lamping G. A and Jonas O. 1989, Boiler tube failure: Correction, Prevention and Control, research project RP1890-7, Final Report GS-6467, EPRI, Palo Alto, CA.
- Ellis F. V. & Tordonato S. 1999.
- Failure analysis and life assessment for boiler tubes, PVP-Vol. 392, Service experience in fossil and nuclear power plants, ASME.
- Hjalmarsson L. & Kjörk A. 1998. Korrosion i överhettare vid biobränsleeldning, Värmeforskrapport 623.
- Henderson P., Kjörk A., Ljung P., Nyström O. & Skog E. 1999. Överhettarkorrosion i bioeldade anläggningar - status, Värmeforskrapport 700.
- Husemann R. U., 1999. Materials and their Service Properties for Superheater and Reheater tubing in Power Stations with Advanced Steam Parameters, VGB Power-Tech 10/99.
- Nordin A. & Levén P. 1997. Askrelaterade driftproblem i biobränsleeldade anläggningar, Värmeforskrapport 607.
- Viswanathan R. 1989. Damage mechanisms and life assessment of high-temperature components, ASM International, Metals Park, Ohio.
- Viswanathan R., Paterson S. R. Grunloh H. & Gehl S. 1995. Life assessment of superheater/reheater tubes in fossil boilers, Proceedings of the American Power Conference, Vol. 57-III, Illinois Institute of Technology, Chicago.

### 2.1.6 Ekonomisarar

I pannans ekonomiser förvärms det till pannan inkommande vattnet, matarvatten, som ersätter vatten som förångas i pannan. Ekonomisern är alltid placerad efter överhettare och förångningsytor och vanligen före luftförvärmare, om sådan förekommer. Den till ekonomisern inkommande rökgastemperaturen är relativt låg. Pannans väggar i det område där ekonomisern är installerad är därför oftast utförda i plåt utan vattenkylning.

I pannor med låg stoftbelastning utförs ekonomisern med ståltuber placerade i sicksack. Tuberna är då ofta försedda med ytförstoring i form av till exempel kammar utförda i stålplåt eller av gjutjärn. Vid hög stoftbelastning används endast släta tuber och vid mycket hög stoftbelastning installeras tuberna i raka rader efter varandra i gasens strömningsriktning.

Ekonomisern rengörs med olika metoder beroende på mängd stoft i rökgasen och stoftets egenskaper. Sotblåsare med ånga eller luft används liksom även kulsotning, ljudsotning eller slagsotning.

På insidan av de första ekonomisertuberna föreligger det högsta tryck som förekommer i pannan, d.v.s. trycket i domen plus tryckfallet över ekonomiserytan och förbindelserören mellan ekonomiser och ångdom. Materialtemperaturen är dock alltid relativt låg då vattentemperaturen inte överstiger mättnadstemperatur (ett tryck på 100 bar motsvarar mättnadstemperaturen 310°C) och rökgastemperaturen är måttlig. I pannor utan högtrycksförvärmare ligger inloppstemperaturen på vattensidan ofta inom området 105-150°C. I pannor med förvärmare är temperaturen ofta 200-250°C.

Vid anläggningar med låg inkommande matarvattentemperatur återförs ibland uppvärmt matarvatten till inloppssidan för att inte rökgastemperaturen vid låglast skall understiga ett lägsta tillåtet värde. Skälet till detta kan vara att daggpunkten på vattenånga eller korrosiva komponenter inte skall underskridas eller att den efterföljande rökgasreningsutrustningen skall fungera på bästa sätt. Ibland förbikopplas en del av den första ytan av samma skäl.

Normalt används olegerat tryckkärlsstål i de tryckbärande delarna. Om ekonomisern är försedd med kamflänsar i gjutjärn så består de tryckbärande delarna av tryckkärlsstål som pressats mot gjutjärnsflänsarna.

#### 2.1.6.1 Skador i ekonomisarar

De olika skademekanismer som behandlas nedan beskrivs närmare i **kapitel 1.5**.

##### *Korrosionsskador*

Korrosionsskador på ekonomisarar förekommer i huvudsak vid eldning med avfall och oljor med hög svavelhalt och orsakas av utfällning av korrosiva ämnen i rökgaserna (i huvudsak vattenånga, klorväte och svaveloxider speciellt SO<sub>3</sub>). Problemen uppkommer vid låg materialtemperatur då daggpunkten för dessa ämnen underskrids. Den lägsta temperaturen uppträder i den del av ekonomisern där rökgaserna lämnar denna och matarvattnet leds in i tuberna.

Om luft läcker in, till exempel genom otäta luckor, kan temperaturen sänkas i närheten av läckan så att daggpunkten lokalt underskrids vilket innebär att väggar, luckramar, luckor med mera kan skadas av korrosion. Även otillräcklig isolering och köldbryggor vid stödkonstruktioner kan ge korrosionsskador på väggarna.

Tubernas materialtemperatur kommer på ekonomiserns inloppssida att ligga någon grad över inkommande matarvattentemperatur. Korrosion kan vid hög halt korrosiva ämnen uppkomma vid en så hög matarvattentemperatur som 140-150°C. De största korrosionsriskerna förekommer vid anläggningar där matarvattnet före ekonomisern inte förvärms. I pannor där kväveoxider reduceras med selektiva icke katalytiska metoder kan en hög ammoniakhalt i rökgaserna även öka korrosionsrisken.

Samma typ av korrosionsangrepp kan uppkomma vid stillestånd om beläggningar på ytorna innehållande korrosiva ämnen utsätts för fukt.

I vissa fall kan tubförtunning förekomma på tubernas utsida nära ångdomen i pannor med ångdom. Problemet har speciellt uppmärksamats i sodapannor där man har förklarat fenomenet som ett resultat av fukt från sotblåsare i kombination med aggressiv kemi i tjocka beläggningar på tuberna i anslutning till invalsnings i ångdomar.

Korrosionsskadorna uppträder som en godsförtunning, ofta med gropar.

#### *Erosion*

I pannor där bränslen med hög askhalt används kan erosionsskador uppkomma. Erosion uppträder där askpartiklar med hög hastighet träffar tubytan. Erosion kan uppkomma vid ojämn gashastighet över tvärsnittet, om gashastigheten är högre än normalt till exempel om en stor del av ytan har satts igen av askbeläggningar eller om ursprungliga konstruktionsdata överskrids på grund av överlast eller byte till bränslen som ger högre gasflöden eller högre askhalt. Ledskenor kan ge felaktig omlänkning som medför att askpartiklar träffar tubytor. Tuber som deformerats och sticker ut mellan tubraderna skyddas inte av ovanstående tuber och kan därmed utsättas för erosion.

Tuberna kan även skadas av sotningsutrustning. Kulor, luft och ånga kan till exempel träffa tubytor med hög hastighet och ge erosionsskador.

Skadorna uppträder som plana, slipade partier på begränsade delar av tubytan. På skadade partier reduceras tubernas godstjocklek. Vid hög erosion uppträder ofta skarpkantade räfflor. Vid lägre erosion blir kanterna avrundade.

#### *Termisk utmattnings*

Termisk utmattnings kan uppkomma om materialet omväxlande värms upp och kyls ned till exempel om heta ytor träffas av kondensatdroppar från sotblåsare.

Skador har även uppstått vid genomföringar i inloppslådan i fall av snabba och återkommande variationer i inkommande matarvattentemperatur.

#### *Korrosionsutmattnings*

Vid en cyklisk belastning av material i en korrosiv miljö kan tuber utsättas för korrosionsutmattnings. Denna kan uppkomma på utsidan av tuber i ekonomiserns inloppssida som är utsatta för korrosion orsakad av att daggpunkten för korrosiva ämnen i gaserna underskridits och samtidigt är utsatt termisk varierande belastning eller höga spänningar vid infästningspunkter eller upphängningar. På tubernas insida kan gropfrätning uppträda runt rörets periferi på områden med höga spänningar och hög syrehalt i vattnet. Gropfrätningsskador utgör ofta initieringar till korrosionsutmattnings.

Skadorna uppträder som sprickor orienterade vinkelrätt mot spänningarna i materialet. Sprickorna är belagda med korrosionsprodukter. På tubernas insida förekommer pitting i anslutning till sprickorna.

#### *Gropfrätning*

Korrosion i form av gropfrätning kan uppträda på tubernas insida om matarvattnet inte avgasats och innehåller syre. Vid dålig avgasning av matarvatten är ekonomisern den första panndel som utsätts för det syrehaltiga vattnet.

Gropfrätning kan även uppkomma under perioder då anläggningen är avställd och tuberna inte torkats invändigt. Fickor där vatten normalt inte dräneras ut vid avställningar är speciellt utsatta.

Tuber som utsätts för pitting uppvisar kraterlika fördjupningar i materialet. Ytan är rödaktig på grund av korrosionsprodukten  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ .

#### *Kemiska angrepp*

Tuberna kan skadas efter kemisk rengöring eller betning om kemikalierna inte neutraliserats efter rengöringen. Vid fel på vattenbehandlingsutrustning kan även frätande ämnen följa med matarvattnet in i pannan.

Vid kemiska angrepp förtunnas godset runt hela periferin. Skadorna uppträder som större gropar, gropfrätning eller sprickor.

#### *Mekanisk åverkan*

Rengöring av ekonomiserytor som till exempel blästring, högtrycksspolning, vibrering vid stillestånd kan ge skador orsakade av mekanisk åverkan på tuber och upphängningsdetaljer. Utmattningskador på tuber kan även uppkomma vid infästningspunkter till lådor om ytorna sotas med så kallad slagsotning.

Vid mekanisk åverkan kan tubytan deformeras eller repas som leder till att utmattningsprickor initieras.

#### *Skador på stöd för tubpaketen*

Stålbalkar och dylikt som används för att bära upp tubpaketen kan utsättas för termisk utmattningskador med sprickbildning som följd.

#### *2.1.6.2 Provnings- och ekonomisrar*

##### *Korrosions- och erosionsskador*

Till syfte att söka korrosions- och erosionsskador rengörs tubytorna och undersöks visuellt. Tubernas godstjocklek kan mätas med ultraljudsprovning för att konstatera storleken av eventuell godsavverkning.

Om förtunning har observerats i anslutning till ångdomar kan en provning utföras med speciella givare för virvelströmsmätning som införs i tuberna från insidan i domen.

##### *Termisk utmattningskador och korrosionsutmattningskador*

Sprickor orsakade av termisk utmattningskador eller korrosionsutmattningskador kan upptäckas med penetrant- eller magnetpulverprovning. Invändiga sprickor i tjockväggigt gods kan upptäckas och storleksbestämmas med ultraljudsprovning. Eventuell



sprickbildning på insi-dan av inloppslådan kan också kontrolleras med videoskopi genom en inspektionsstuts.

#### *Gropfrätning eller kemiska angrepp*

Skador orsakade av gropfrätning eller kemiska angrepp kontrolleras säkrast genom att ta ut ett tubprov.

#### *Mekanisk åverkan*

Skador orsakade av mekanisk åverkan, t.ex. i samband med sotning, kan upptäckas vid en visuell inspektion efter rengöring av de provade ytorna. En godsförtunning kan fastställas med ultraljudsprovning.

#### *Stödbalkar*

Sprickor i stödbalkar kan upptäckas med penetrant- eller magnetpulverprovning.

#### *2.1.6.3 Återstående livslängd hos ekonomisar*

Skador på ekonomisar kan i allmänhet avhjälpas genom att endast vissa delar av ekonomisern byts ut. Det är vanligtvis de kallaste partierna eller vissa upphängningsdetaljer, som är mest utsatta för korrosion som behöver bytas.

En förutsättning för att nå den livslängd som anläggningen byggts för eller högre livslängd är att underhållet hålls på en hög nivå genom att ekonomisern under drift rengörs från stoffbeläggningar i möjligaste mån och eventuella läckage vid till exempel luckor tätas. Det är också viktigt att inkommande matarvattentemperatur och utgående rökgastemperatur inte underskrider de värden som kan innebära att daggpunkten underskrids. Om korrosionsskador upptäcks måste åtgärder för att undvika dessa snarast vidtas.

Vid ändrade driftförhållanden, till exempel byte av bränsle eller ändring av luftöverskott, måste inverkan på daggpunkten på skadliga ämnen i gaserna undersökas och matarvattentemperaturen och/eller ekonomiserns yta anpassas efter de nya förhållandena.

Den återstående livslängden för de olika sektionerna av en ekonomiser bestäms genom att tiden tills en bedömd materialavverkning, troligen orsakad av korrosionsskador, reducerat godstjockleken så att tillåtna hållfasthetsvärden underskrids eller att gropar blivit så djupa att läckage förväntas uppkomma.

I fall av varierande temperatur på inkommande matarvatten kan livslängden beräknas med en utmattnings- och skadetålighetsanalys av fördelningslådan. Mätvärden av temperaturvariation samt frekvens är indata till analysen.

#### *2.1.7 Luftfövärmare*

Rökgasernas temperatursänkning efter överhettare och förångarytor delas ofta upp i två steg vilket förbättrar anläggningens verkningsgrad. I det första steget sänks temperaturen med en ekonomiser enligt **avsnitt 2.1.6** och i det andra steget med en luftfövärmare. Ibland är luftfövärmaren placerad före ekonomisern. I luftfövärmaren kyls rökgaserna med pannans förbränningsluft som därmed förvärms.

I pannor där fuktiga bränslen används utnyttjas den uppvärmda luften för att driva ut fukt och förbättra förbränningen. Vid bränslen med hög fukthalt är uppvärmning av förbränningsluften nödvändig för att klara en bra förbränning.

I anläggningar med luftförvärmare förvärms alltid matarvattnet före ekonomisern.

Materialtemperaturen i luftförvärmaren är vid gasutloppet relativt låg vilket innebär att risk finns för att daggpunkten för vattenånga eller korrosiva ämnen som svaveloxider eller klorväte underskrids. Denna del i en pannanläggning är därför ofta är den del som är mest utsatt för korrosion. Temperaturen på luften eller inkommande rökgastemperatur anpassas därför efter rökgasens innehåll av korrosiva ämnen så att god marginal skall finnas till daggpunkten. För att undvika korrosion kan även temperaturen på förbränningsluften före luftförvärmaren höjas med hjälp av ång- eller hetvattenförvärmare. Ju högre halt korrosiva ämnen som förekommer i rökgasen desto högre förvärmning luften behövs.

Luftförvärmare kan vara av regenerativ eller rekuperativ typ.

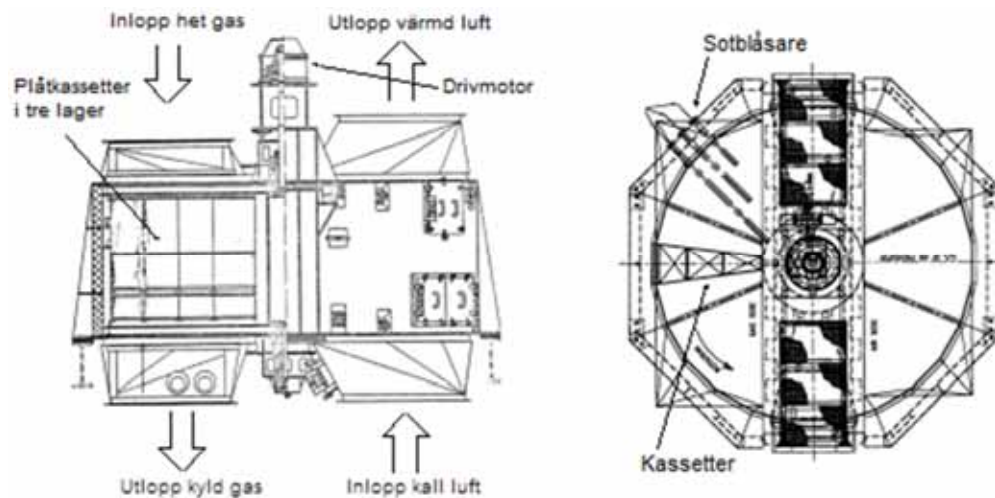
I en regenerativ förvärmare flyttas ett värmemagasin växelvis mellan rökgassida och luftsida. Denna typ är normalt utformad med värmemagasinen placerade på en rotor med vertikal eller horisontell axel, till exempel Ljungströmsförvärmare. Rökgaser och luft passerar rotorn längs med axeln. Ett visst läckage av luft över till rökgassidan förekommer alltid. Läckaget kontrolleras med tätningar i både radiell och axiell led. Den mängd luft och gas som finns mellan plåtarna vid passage till den andra sidan kan dock aldrig förhindras.

Värmemagasinen består av kassetter med tätt ställda, veckade plåtar. Kassetterna är ofta placerade i flera lager. Plåtarna i de kassetter som ligger mot den varma sidan är ofta utförda i normala konstruktionsstål medan de på den kalla sidan kan vara utförda i ett material som står emot korrosion bättre, till exempel låglegerade så kallade rosttröga stål. Den roterande delen med vertikal axel är upphängd i ett axiallager.

En rekuperativ förvärmare består av en tubvärmeväxlare där rökgaser passerar på ena sidan av tuberna och luft på den andra sidan, oftast tubernas insida. Denna förvärmare är normalt helt tät.

Båda typerna renas från stoft med sotblåsare med luft eller ånga.

I Figur 2.1-12 nedan visas en luftförvärmare av regenerativ typ.



**Figur 2.1-12. Regenerativ luftförvärmare**  
**Figure 2.1-12. Regenerative air preheater**

Pannorna i Figur 2.1-1 och 2.1-2 är försedda med en roterande luftförvärmare med horisontell axel. Pannan i Figur 2.1-3 är försedd med en förvärmare av tubtyp.

#### 2.1.7.1 Skador i luftförvärmare

##### Korrosionsskador

Vid luftförvärmare kan korrosionsskador uppkomma på rökgasberörda ytor om materialtemperaturen underskrider daggpunkten för vattenånga eller korrosiva ämnen i rökgaserna.

Vid roterande värmeväxlare förekommer korrosionsskador på de värmeöverförande plåtarna i den kalla delen av luftförvärmaren, det vill säga på de plåtar som växelsvis genomströmmas av den kalla inkommande luften och växelsvis av den kylda utgående rökgasströmmen.

Vid tubvärmeväxlare kan korrosionsskador förekomma på rökgasberörda tubytor på värmeväxlarens utloppssida. Om tuberna är försedda med ytförstorande element kan dessa skadas och då i första hand nära tubytan.

Vid dåligt isolerade stålväggar mot omgivningen och vid otäta inspektionsluckor eller inspektionsöppningar kan, vid båda typerna av luftförvärmare, korrosionsskador uppträda på insidan av väggar, luckor, luckramar och dylikt.

Skadorna ger upphov till materialförtunning med gropig ytstruktur.

##### Erosionsskador

Erosionsskador kan uppträda där luft eller ånga från sotblåsare träffar plåtar i roterande värmeväxlare eller tuber i tubvärmeväxlare. Vid igensättning med stoft av plåtar eller tubpaket kan gasströmningen hindras och hastigheten öka så mycket i de fria passagerna att erosion kan uppkomma. Igensättningar försämrar även värmeöverföringen.

Skadorna uppträder som plana, slipade partier på begränsade delar av den utsatta ytan. På skadade partier reduceras godstjocklek. Vid hög erosion uppträder ofta skarpkantade räfflor. Vid lägre erosion blir kanterna avrundade.

#### *Slitage*

Roterande förvärmare kan även erhålla slitageskador på tätningar som ökar läckaget mellan luft- och gassida. Lager och drivmekanism för den roterande delen kan även skadas genom slitage.

##### *2.1.7.2 Provnings av luftförvärmare*

De rökgasberörda delarna inklusive hölje och luckor rengörs och besiktigas visuellt. Speciellt inspekteras ytor som träffas av ånga eller luft från sotblåsare. Vid roterande förvärmare är endast den yttre delen av plåtarna i luftförvärmarens båda ändar inspekterbar utan demontage. En av de kassetterna i den kalla delen bör därför lyftas ut och plåtarna i kassetten demonteras. I roterande förvärmare kan testplåtar installeras vilka sedan kan tas ut efter en viss drifttid utan att en hel kassett måste demonteras.

Bärande konstruktioner, i synnerhet delar dolda av isolering, för roterande förvärmare bör även inspekteras med avseende på korrosion. Tätningssystem inspekteras med tanke på slitage.

Den visuella besiktningen kan sedan följas upp mätning av materialtjocklek med ultraljudsprovning. Ett täthetsprov bör även genomföras på båda typerna av förvärmare.

##### *2.1.7.3 Återstående livslängd hos luftförvärmare*

Genom att uppskatta hastigheten på ytornas godsförtunning kan tiden för genombrott bedömas. Ett genombrott på tubmaterial på en luftförvärmare av värmeväxlartyp medför att luft läcker in i rökgaserna och korrosionen ökar. Luftläckage medför även att fläkarbetet ökar och anläggningens verkningsgrad försämras. En god marginal mot genombrott bör finnas.

Vid roterande förvärmare har inte mindre genombrott i plåtarna någon väsentlig betydelse för ett ökat luftläckage eller värmeöverföringen. En skrovlig yta kan innebära att stoft lättare fastnar varför plåtar med korrosionsangrepp bör bytas ut.

Slitna tätningar i roterande förvärmare påverkar läckaget av luft till rökassidan. Skadade tätningar repareras eller byts. Vid mycket svåra skador, där ett läckage bedöms kvarstå även efter reparation, kan det vara ekonomiskt motiverat att byta hela förvärmaren.

Om korrosionsskador konstaterats bör åtgärder för att minska korrosionen vidtas, till exempel att höja temperaturen på inkommande luft eller inkommande rökgas till återvärmaren. En annan möjlighet är att byta bränsle mot en typ som ger mindre andel korrosiva ämnen i rökgaserna.

##### *2.1.8 Ång- och hetvattenluftförvärmare*

I anläggningar med luftförvärmare i gasstråket, enligt **avsnitt 2.1.7**, förvärms oftast luften före inloppet till denna med en förvärmare, speciellt vid uppstart av anläggningen. Luften värms med ånga eller hetvatten. Även i anläggningar utan

luftförvärmare används ofta denna typ av förvärmare, i synnerhet vid förbränning av fuktiga bränslen.

Denna förvärmare består vanligen av en tubvärmeväxlare med ytförstorande element. Luften passerar på tubernas utsida och det uppvärmade mediet på insidan. Trycket i tuberna ligger oftast inom området 10- 20 bar.

#### *2.1.8.1 Skador i ång- och hetvattenluftförvärmare*

Denna värmare är sällan utsatt för skador. Nedan beskrivs dock några skador som kan förekomma.

Om kall uteluft kan tillföras direkt till värmaren och system för frysskydd saknas eller inte fungerar kan vatten eller kondensat i tuberna frysa och tubmaterialet deformeras till brott.

Om tubbytor kan utsättas för regndroppar kan korrosionsskador uppkomma på de yttersta tubraderna.

Vid felaktig utformning kan stumt inspända tuber utmattas vid upprepande utvidgning i samband med uppvärmning och avkylning.

Om kondensat följer med ånga vid uppstart kan ångslag uppkomma som kan deformera tuber och skada tubinfästningar i lådor.

#### *2.1.8.2 Provning av ång- och hetvattenluftförvärmare*

Vid provning provtrycks värmeväxlaren och avsynas visuellt. Om konstruktionen inte verkar klara termisk utvidgning, kan utsättas för frysning eller om ångslag förekommit kan även misstänkta partier penetrant- eller magnetpulverprovas för undersökning av eventuell sprickbildning.

#### *2.1.8.3 Återstående livslängd hos ång- och hetvattenluftförvärmare*

Livslängden kan bedömas genom att uppskatta om sprickor är benägna att tillväxa och även i så fall den tid för det tar för upptäckta sprickor att uppnå genombrott. Brottmekaniska beräkningar kan utföras för sådana bedömningar.

### **2.1.9 Fjärrvärmeekonomisar**

I anläggningar där rökgastemperaturen efter pannans ekonomiser eller luftförvärmare kan sänkas ytterligare används ibland en ekonomiseryta som ofta placeras i rökgaskanalen utanför pannan. Detta gäller även anläggningar med hög stofthalt efter rening av rökgaserna. I denna ekonomiser kyls rökgaserna med fjärrvärmevatten. Det förekommer även att annat vatten än fjärrvärmevatten används som kylmedium.

En fjärrvärmekyld ekonomiser utformas på samma sätt som en ekonomiser för matarvatten enligt 2.1.6. Ekonomisern utförs med okylda väggar i olegerat stål. Då stofbelastning normalt är låg utförs ekonomisern vanligen med ståltuber placerade i sicksack och försedd med ytförstoring. En fjärrvärmekyld ekonomiser saknar ofta utrustning för rengöring under drift.

Det i tuberna invändiga trycket är normalt avsevärt lägre än i den ordinarie ekonomisern. Vanliga drifttryck ligger inom området 5- 10 bar. Konstruktionstrycket är vanligen 10- 16 bar.

I anläggningar med hög halt korrosiva ämnen i rökgaserna reduceras dessa ämnen ofta i rökgasrengöringsanläggningen efter pannan med en lägre daggpunkt som följd. Korrosion på grund av att daggpunkten för vattenånga eller korrosiva ämnen underskrids kan vanligen undvikas om inkommande vattentemperatur överstiger 90-100°C. Detta åstadkoms genom att varmt utgående vatten shuntas tillbaka till inloppssidan.

#### 2.1.9.1 Skador på fjärrvärmeekonomisar

##### *Korrosionsskador*

Korrosionsskador på fjärrvärmeekonomisar förekommer i huvudsak vid eldning med avfall och oljor med hög svavelhalt och orsakas av utfällning av korrosiva ämnen i rökgaserna (i huvudsak vattenånga, klorväte och svaveloxider speciellt SO<sub>3</sub>). Problemen uppkommer vid låg materialtemperatur då daggpunkten för dessa ämnen underskrids. Den lägsta temperaturen uppträder i den del av ekonomisern där rökgaserna lämnar denna och fjärrvärmevattnet leds in i tuberna.

Om luft läcker in, till exempel genom otäta luckor, kan temperaturen sänkas i närheten av läckan så att daggpunkten lokalt underskrids vilket innebär att väggar, luckramar, luckor med mera kan skadas av korrosion. Även otillräcklig isolering och köldbryggor vid stödkonstruktioner kan ge korrosionsskador på väggarna.

Tubernas materialtemperatur kommer på ekonomiserns inloppssida att ligga någon grad över inkommande fjärrvärmetemperatur. I pannor där kväveoxider reduceras med selektiva icke katalytiska metoder kan en hög ammoniakhalt i rökgaserna även öka korrosionsrisken.

Samma typ av korrosionsangrepp kan uppkomma vid stillestånd om beläggningar på ytorna innehållande korrosiva ämnen utsätts för fukt.

Korrosionsskadorna uppträder som en materialförtunning, ofta med gropar.

##### *Erosion*

Erosionsskador är mindre vanliga på grund av lägre stoffbelastning men kan förekomma vid felaktig omlänkning av gasflödet eller ojämnt gasflöde genom ekonomisern.

Skadorna uppträder som plana, slipade partier på begränsade delar av tubytan. På skadade partier reduceras tubernas godstjocklek. Vid hög erosion uppträder ofta skarpkantade räfflor. Vid lägre erosion blir kanterna avrundade.

##### *Gropfrätning*

Korrosion i form av pitting kan uppträda på tubernas insida om fjärrvärmevattnet innehåller syre.

Gropfrätning kan även uppkomma under perioder då anläggningen är avställd och tuberna inte torkats invändigt. Fickor där vatten normalt inte dräneras ut vid avställningar är speciellt utsatta.

Tuber som utsatts för pitting uppvisar kraterlika fördjupningar i materialet. Ytan är rödaktig på grund av korrosionsprodukten Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

*Mekanisk åverkan*

Rengöring av ekonomiserytor som till exempel blästring, högtrycksspolning, vibrering vid stillestånd kan ge skador orsakade av mekanisk åverkan på tuber och upphängningsdetaljer.

Vid mekanisk åverkan kan tubytan deformeras eller repas och sprickor kan uppkomma. Vid utmattningsskador uppkommer sprickor i materialet.

*2.1.9.2 Provnings av fjärrvärmeekonomisar**Korrosions- och erosionsskador*

Vid korrosions- och erosionsskador rengörs tubytorna och undersöks visuellt. Tubernas godstjocklek kan mätas med ultraljudsprovning för att konstatera eventuell storlek av godsavverkning.

*Gropfrätning eller kemiska angrepp*

Skador orsakade av gropfrätning eller kemiska angrepp kan upptäckas genom att godstjockleken mäts med ultraljudsprovning. För att nå bra resultat måste ytorna rengöras noggrant. Speciella metoder med ultraljudsprovning kan krävas för att kunna detektera gropfrätning.

*Mekanisk åverkan*

Skador orsakade av mekanisk åverkan kan upptäckas vid en visuell inspektion efter rengöring av de provade ytorna. En godsfortunning kan fastställas med ultraljudsprovning.

*2.1.9.3 Återstående livslängd hos fjärrvärmeekonomisar*

Skador på fjärrvärmeekonomisar kan i allmänhet avhjälpas genom att endast vissa delar av ekonomisern byts ut. Det är vanligtvis de kallaste partierna eller vissa upphängningsdetaljer, som är mest utsatta för korrosion som behöver bytas.

En förutsättning för att nå den livslängd som anläggningen byggts för eller högre livslängd är att underhållet hålls på en hög nivå genom att ekonomisern under vid avställning rengörs från stoftbeläggningar i möjligaste mån och eventuella läckage vid till exempel luckor tätas. Det är också viktigt att temperaturen på inkommande fjärrvärmevatten inte underskrider de värden som kan innebära att daggpunkten underskrids. Om korrosionsskador upptäcks måste åtgärder för att undvika dessa snarast vidtas.

Vid ändrade driftförhållanden, till exempel byte av bränsle eller ändring av luftöverskott, måste inverkan på daggpunkten på skadliga ämnen i gaserna undersökas och temperaturen på inkommande fjärrvärmevatten och/eller ekonomiserns yta anpassas efter de nya förhållandena.

Den återstående livslängden för en fjärrvärmeekonomiser bestäms genom att tiden tills en bedömd materialavverkning, vanligen orsakad av korrosionsskador, reducerat godstjockleken så att tillåtna hållfasthetsvärden underskrids eller att gropar blivit så djupa att läckage förväntas uppkomma.



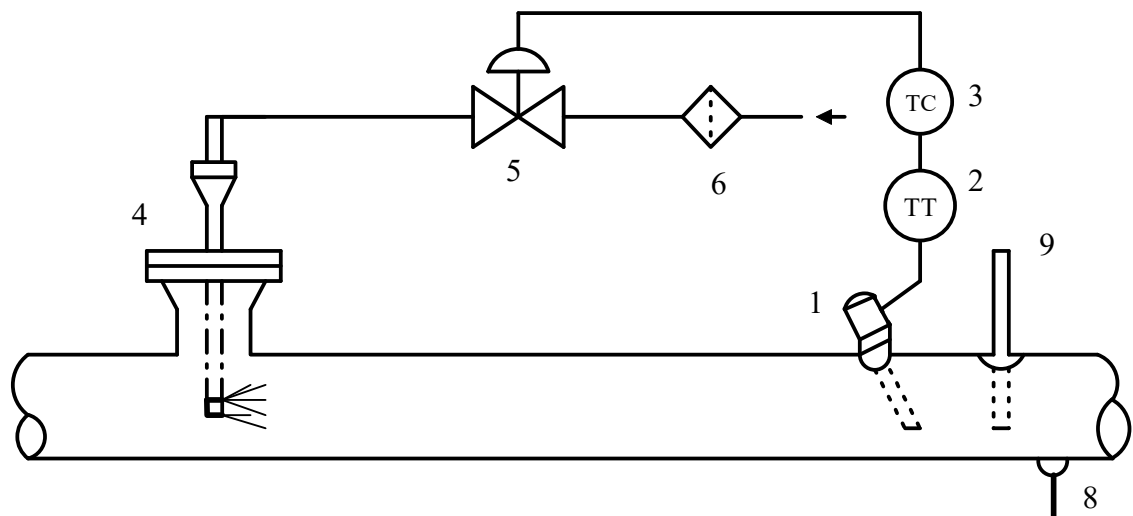
### 2.1.10 Ångkylare

#### Konstruktion

Överhettartemperaturen ökar i princip med ökande last på pannan. Det är dock väsentligt att kunna hålla den dimensionerade överhettartemperaturen konstant även om lasten varierar. För att kunna hålla en jämn temperatur i hela lastområdet kylar man ångan med ökande mängd med ökande last. Till detta används ångkylare som placeras mellan överhettarstegen.

Principen för de flesta ångkylare är att matarvatten eller kondenserad ånga förs in i den heta ångan och kylar denna, främst genom att den omvandlingsenergi som krävs för att förgasa vätskan tas ifrån den heta ångan vilket resulterar i att temperaturen sjunker.

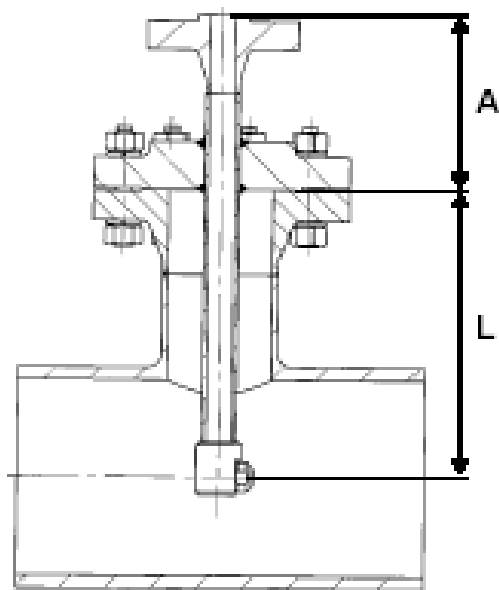
Den vanligaste och enklaste typen av ångkylare består av en insprutningsdysa monterad på en stuts som leds rakt in i röret med ångflöde. Dysan är riktad med ångflödet och omkring dysan finns vanligen ett skyddsrör intill rörväggen för att skydda denna mot temperaturvariationerna som uppstår vid insprutningen. Efter insprutningsdysan finns det en zon i röret där ångan blandas med kylvattnet och ångtrycket återställs. Utförande av reglerutrustning för kylvattnet illustreras i Figur 2.1-13. Figur 2.1-14 visar insprutningsdelen mera i detalj.



- |                         |                                  |
|-------------------------|----------------------------------|
| 1. Temperaturgivare     | 5. Ventil för vatteninsprutning. |
| 2. Temperatursändare    | 6. Kylvattensil                  |
| 3. Temperaturövervakare | 8. Dränering                     |
| 4. Ångkylare            | 9. Kontrolltermometer            |

Figur 2.1-13. Typisk installation av insprutningskylare.

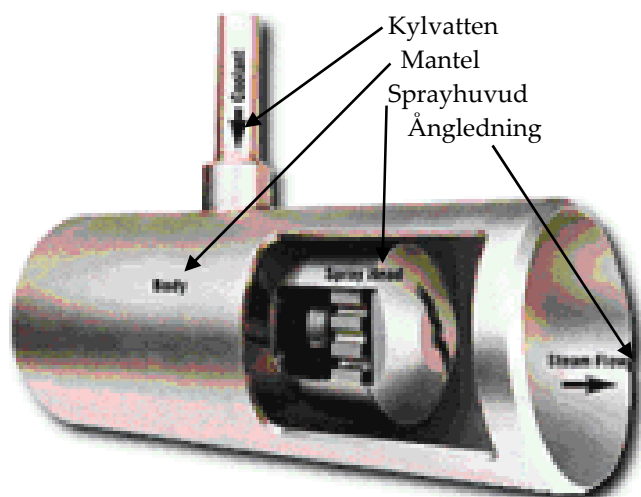
Figure 2.1-13. Typical installation of a desuperheater.



Figur 2.1-14. Insprutningsdel av ångkylare.

Figure 2.1-14. Desuperheater

I många fall är kylaren utformad som en ånglåda där blandningen sker. I en variant av denna konstruktion är tuben som kylvattnet förs in igenom krökt inuti ångröret och efter krökningen sitter ett större sprayhuvud, se figur 2.1-15. Dysan eller sprayhuvudet omfattar vanligen också en konstruktion som ser till att vattnet får både en hög rotation och en hög hastighet. Då förgasas kylvattnet mycket snabbt vilket ger en snabb och effektiv kylning av ångan.



Figur 2.1-15. Ångkylare med sprayhuvud.

Figure 2.1-15. Desuperheater with spray head.

En annan typ av ångkylare är den så kallade ytkylaren. Där används pannvatten som kylmedium. Pannvattnet leds av från botten av domen till en behållare med tuber. Överhettad ånga förs in i tuberna och ångtemperaturen sjunker samtidigt som vattentemperaturen höjs. Vattentemperaturen höjs så mycket att den förångas och ångblåsorna stiger mot kylarens topp. Där finns det ett rör som går till domen och in i sidan av denna. Med en sådan konstruktion får man en självirkulation av pannvattnet genom kylaren. På ångsidan finns en reglerventil och en temperaturkännare som reglerar hur mycket ånga som behöver släppas in i kylaren. En ganska vanlig typ av sådana ytkylare kallas dolezalkylare. I sådana är vattenbehållaren ett långt lutande rör som tuberna ligger i. Storleken kan typiskt var ca 10 m långt och 500 mm i diameter, Det förekommer också konstruktioner där tuber med ånga leds direkt in i ångdomens nedre del för kylning.

#### *Material*

Manteln till insprutningskylare utförs i något lämpligt varmhållfast stål som matchar de ångtemperaturer som ångkylaren utsätts för. Vanligen används samma rörstål som till de anslutande ångledningar och intilliggande ånglådor som arbetar vid samma temperatur som kylaren, se **kapitel 2.2 Ångledningar**.

Det hölje som skyddar kylarens mantel från temperaturchocker tillverkas ofta i samma material som manteln. För bättre hållbarhet kan dock ett hölje av en nickelbaslegering sättas in, t ex INCONEL 600.

Munstycke och anslutande delar består ofta av högre legerade stål än i manteln, t ex 12 % Cr stål då kylarens mantel är av låglegerade eller C-Mn stål.

Ytkylare har vanligtvis en relativt låg arbetstemperatur som inte överstiger 300°C. Vanliga konstruktionsmaterial är ordinära tryckkärlsstål t ex St 35.8 I-III.

#### *2.1.10.1 Skador i ångkylare*

Den främsta orsaken till att skador uppstår i insprutningskylare är att vissa delar utsätts för temperaturvariationer som åstadkommer utmattningssprickor. Svetsar i de delar som har större temperaturvariationer utgör särskilt sätespunkter till utmattningssprickor. Vanligen finns ett skyddsrör som ett hölje runt insprutningen. I detta hölje är det vanligt att utmattningssprickor och spänningskorrosionssprickor uppstår. Problem med spänningskorrosion elimineras dock om skyddsröret tillverkas av en nickelbaslegering. Sprickor av begränsat antal och begränsad längd i skyddsröret kan tolereras så länge de inte är genomgående. Sprickor uppstår dock ofta också i fästsvetsar så att skyddsröret till slut lossnar.

Insprutningsdysan eller sprayhuvudet samt stutsar på kylaren är också utsatta för temperaturvariationer och kan drabbas av utmattningsskador. Om de utsätts för ångtryck som de inte är utformade för kan erosionsskador uppstå.

Om delar lossnar i ångkylaren, far de vidare i ångsystemet och kan orsaka stora skador på överhettare.

Stutsen som insprutningsdysan förs in igenom är utöver termisk utmattnings även känslig för krypskador om kylaren arbetar i krypområdet.

Som kylmedium används antingen mättad ånga från ångdomen som kondenseras i en kondensor eller så används spädvatten. Om spädvatten används måste vattenkvaliteten vara hög och utan skadliga kontaminanter såsom salter.

I ytkylare slipper man risken för att saltmängden ska öka i matarvattenssystemet. Ytkylare har dock en nackdel med att korrosion lätt kan uppstå i tubernas nedre del, vilket i värsta fall inte upptäcks förrän läckage uppstår vilket kan få ödesdigra följder. Korrosionen består ofta av gropfrätning där relativt stora och avlånga gropar bildas. Groparna är ibland rena men oftast fyllda med korrosionsprodukter. I ytkylare kan även vibrationer uppstå. Sådana problem kan avhjälpas med att ändra ångflödet. I dolezalkylare finns det en mellanvägg vid inloppet som kan lossna, vilket resulterar i en starkt nedsatt funktion av kylaren.

#### 2.1.10.2 Provnings av ångkylare

##### *Insprutningskylare*

Vid en fullständig provning utförs följande:

- Digitalröntgen (DRT) kan effektivt detektera invändiga sprickor och andra invändiga skador.
- MT utförs på svetsar på ångkylarens utsida.
- Om ångkylaren arbetar i kryptområdet replikprovas stutssvetsar på utsidan efter den drifttid som rekommenderas för komponenten i fråga. I många fall bör en första undersökning utföras senast efter ca 100 000 drifttimmar.

##### *Ytkylare*

Ytkylaren inspekteras invändigt med endoskop med avseende på korrosion. Dessutom utförs godstjockleksmätningar av tuberna, i första hand på nederdelen. I dolezalkylaren provas även insvetsningar av matarvattenrör samt skiljeväggen vid infästningarna med MT. Inloppshål inspekteras visuellt med avseende på förslitning i hålet. Endoskop används om så behövs. I ledningarna till och från Dolezalkylaren finns ofta en böj strax efter kylaren som är känslig för erosion och godstjockleken bör mätas, lämpligtvis då kylaren inspekteras.

#### 2.1.10.2 Återstående livslängd hos ångkylare

Ångkylaren är en kritisk komponent då skador i denna kan leda till driftstopp och allvarliga skador i andra delar av anläggningen. Av denna anledning bör förebyggande under-håll tillämpas för ångkylare. En första fullständig provning bör genomföras vid ca 6 års drift. Om inga påtagliga skador finns kan nästa provning ske ca 6 år senare. Man får dock räkna med att inredningen förr eller senare får skador som måste åtgärdas. Upptäcks mindre skador som inte behöver repareras omgående får inspektionsintervallen förkortas för övervakning av skadeutvecklingen tills en reparation är nödvändig.

För insprutningskylare rekommenderas att ha reservdelar till munstycket och anslutande delar till detta. Det är vanligt med omfattande bildning av utmattningssprickor i skyddshöljet som då får bytas ut. Om de är i behov av byte redan vid den första inspektionen kan det vara lämpligt att försöka förbättra utförandet. Om utmattningsskador upptäcks på själva röret eller lådan kan en svetsreparation vara en möjlig åtgärd. Man får dock i sådana fall räkna med att sprickorna kommer tillbaka om inte konstruktionen modifieras så att de skadade delarna skyddas. I många fall skulle en svetsreparation bli ett stort och komplicerat arbete. Man skulle då kunna storleksbestämma sprickorna och sedan beräkna om de kan accepteras samt hur fort de kan tillväxa. Om sprickorna är acceptabla kan man försöka modifiera konstruktionen så att propagering av sprickorna upphör. Om detta inte går får man vara beredd på att

byta ut röret eller lådan. För rör eller lådor till insprutningskylare som arbetar i krypområdet så gäller samma slags livslängdsarbete som för ånglådor som arbetar i krypområdet, se **avsnitt 2.1.3**.

För dolezalkylare och andra typer av ytkylare är inspektioner med 3 års intervall lämpligt efter en drifttid på 100 000 timmar. Innan 100 000 timmars drifttid är 6 års intervall föreskrivet. Dessa inspektionsintervall gäller även om det inte finns några påtagliga skador. För ytkylare är det ekonomiskt att ha en bra övervakning på korrosions- och erosionsskador så att produktionsbortfall kan undvikas på grund av läckage och oplanerade byten av skadade delar.

## 2.2 ÅNGLEDNINGAR

### 2.2.1 Allmänt om ångledning

Det finns olika dimensioner och typer av material för rörledningar som transporterar vattenånga i ett kraftvärmeverk. Utförandet **stys av** ångans tryck och temperatur. De material och dimensioneringskriterier som används sätter gränser för vilka tryck och temperaturer som maximalt kan tillåtas.

Anläggningens verkningsgrad ökar i princip med ökad drifttemperatur. Av denna anledning är så höga drifttemperaturer som möjligt är önskvärda. Huvudångledning, som leder ånga från pannor till turbiners högtrycksdel, arbetar i de allra flesta kraftvärmeverk därför vid temperaturer där krypning är dimensionerande, se vidare **avsnitt 1.5.2**. Detta är även vanligt för så kallade varma mellanöverhettade ångledning som förekommer i större pannor och som leder ånga från överhettare till turbinens mellantrycksdelar. För låglegerade stål och för kol-manganstål är gränstemperaturen, där krypning blir dimensionerande, 470-480°C respektive 400-410°C. Exakt temperatur beror på materialsort och om man dimensionerar mot en livslängd på 100 000 eller 200 000 timmar. I svenska kraftvärmeverk är huvudångledning typiskt dimensionerade för att arbeta vid 520-540°C.

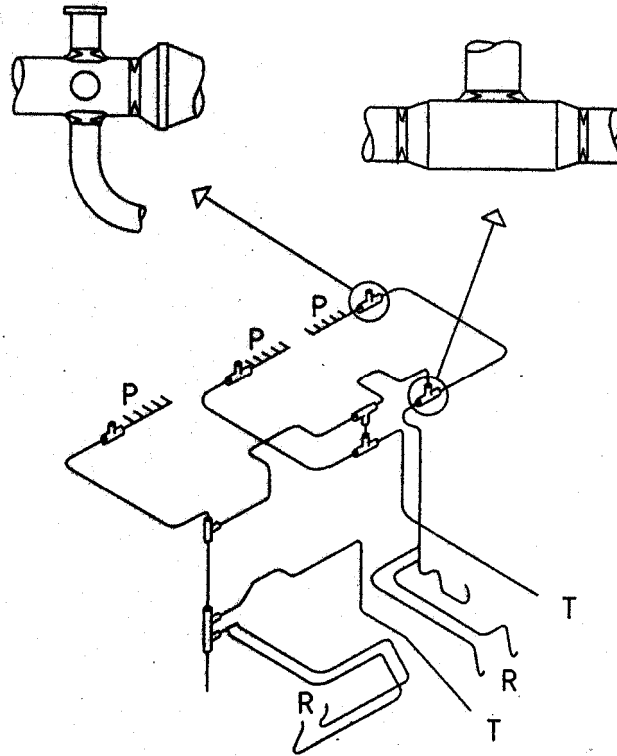
Ångledningsrör kan indelas i tunnväggiga och tjockväggiga. I de gamla rörledningsnormerna definieras rör som tjockväggiga vid godstjocklekar över 10 mm.

Grövre godstjocklekar medför större termiska gradienter genom godset vid starter och stopp. Detta medför i sin tur en större benägenhet för termiska utmattningssprickor i komponenter med dimensionsövergångar. Tunna godstjocklekar innebär dock att kritiska sprickstorlekar kan bli mindre vilket i sin tur medför högre krav på tillförlitlighet och detekteringsgränser vid oförstörande provning.

Eftersom krypdimensionering innebär en ändlig livslängd, som i och för sig kan vara mycket lång, är krypdimensionerade ångledning i stor utsträckning föremål för bedömningar av tillstånd och återstående livslängd. Under senare år har allt fler ångledning som använts vid något lägre temperaturer än den gräns där krypning är dimensionerande visat krypskador efter långa drifttider. Därför ska samtliga ångledning med drifttemperaturer över 350°C, enligt de senaste besikttningsreglerna (AFS 2005:3), kontrolleras som om de vore krypdimensionerade. Typiska skador för olika komponenter beskrivs närmare vid respektive underrubrik nedan.

Huvudångledning och varma mellanöverhettade ångledning utgör ofta omfattande system. Huvudångledning är förknippade med högre tryck än varma mellanöverhettade ångledning vilket innebär att de senare ofta har klenare godstjocklekar

och större rördiametrar. Figur 2.2-1 visar med en isometrisk skiss ett exempel på ett huvudångledningssystem i ett svenskt kraftvärmeverk. Flera pannor och turbiner kan som i figuren vara anslutna till ångledningssystemet och ångan kan regleras från olika pannor till olika turbiner. Det finns även positioner på ångledningen där ångan kan avledas, till exempel till så kallade reducerstationer där tryck och temperatur reduceras. Ångan leds därefter vidare och kan utnyttjas till andra ändamål än att driva högtrycksturbiner.



**Figur 2.2-1** Huvudångledningssystem från pannor (P) till turbiner (T) och reducerstationer (R) med några komponenter utritade.

**Figure 2.2-1** Main steam piping from boilers (B) to turbines (T) and pressure reduction stations (R) where a couple of the components are drawn.

För att fylla sin funktion ingår en rad olika komponenter i ångledningssystemet. I de flesta typer av sådana komponenter kan en förhöjd skadeutveckling uppstå. Raka rördelar kan sägas vara de komponenter som är minst kritiska vid bedömningar av systemets återstående livslängd och är inte med i kapitlets underrubriker. Detta gäller sömlösa rör vilka uteslutande används i svenska anläggningar. Raksvetsade rör det vill säga raka rör med en längsgående svets kan emellertid vara bland de mest kritiska delarna av ångledningssystemet. Sådana rör, som också kan benämnas sömsvetsade rör, används i stor omfattning i exempelvis USA. Svåra olyckor kan inträffa eftersom långa rörpartier är benägna att fläkas upp längs raksvetsen om sprickpropagering har påbörjats (Stevick 1991). Sprickorna initieras dessutom ofta inuti godsväggen eftersom X-fogar är vanligt använda till svetsarna. Denna geometri har visat sig kunna ge kraftigt förhöjda krypspänningar mitt i godset.

Innan olika typer av komponenter behandlas var och en för sig är det väsentligt att betrakta helheten i konstruktionen av ett ångledningssystem. Det finns några olika principer för utformningen som kan ha betydelse för tillvägagångssättet vid undersökningar av tillstånd och bedömningar av återstående livslängd. Ångledningens material kan även inverka på tillvägagångssättet.

### *Konstruktion*

Ångledningarna i Figur 2.2-1 sträcker sig med böjar och förgreningar mellan pannor och turbiner. Den är utformad för att på ett flexibelt sätt kunna ta upp svängningar, expansioner och kontraktioner som uppstår vid start och stopp etc., så kallade rörelsestyrda belastningar.

Gemensamt för krypdimensionerade ångledningar är, åtminstone fram till den senaste generationen, att linjära elastiska beräkningar använts för att åstadkomma en utformning som klarar lasterna. De laster som i verkligheten uppstår kan emellertid i de flesta fall inte helt bestämmas med elastiska modeller. Till exempel förändrar kryprelaxeringar spänningsfördelningar och därmed också systemspänningar i systemet.

Ångledningskonstruktioner kan sägas ha två ytterligheter. Den ena är att så rakt som möjligt leda ångan från det ena stället till det andra. Den andra är att med ett stort utnyttjande av fjäderupphängningar, böjar och lyror minimera inverkan av rörelsestyrda belastningar. Andra förutsättningar för en konstruktion kan vara om utrymmet för ledningen eller placeringen av olika in och utlopp är anpassade med utgångspunkt från en väl utformad ångledning eller om att ångledningen har passats in i ett givet utrymme med givna placeringar av in- och utlopp.

Egenvikten av komponenter kan resultera i lokala spänningskoncentrationer och kryptöjningar som ger förhöjd skadeutveckling i en ångledningskonstruktion.

Det är vanligt att ångledningssystem är tillbyggda eller delvis utbytta. Utbytta delar har ofta en modifierad konstruktion. I samtliga fall av modifierade system finns det förutsättningar för att spänningsfördelningarna i systemet förändras, inte minst i de delar som inte omfattas av ombyggnad. Fördjupande beskrivningar och modeller för att öka förståelsen för, samt bättre kunna hantera uppkomsten av, systemspänningar på konstruktionsstadiet finns angivna i Värmeforskrapport 672 (Segle 1999) [samt i Värmeforsksprojekt M12-218 \(Storesund 2015\)](#). I rapporten ges även beskrivningar av kraft- och rörelsestyrda laster, normer för dimensionering samt dimensioneringskriterier. I EN-standarden (SS-EN13480-3) beskrivs vilka analyser som krävs för att uppfylla kraven för att ett rörsystem motstår effekterna inre övertryck, systemspänningar samt eventuella andra laster.

### *Systemspänningar*

Med systemspänningar avses spänningar som kan förekomma i ångledningar som inte primärt orsakas av det inre övertrycket. Systemspänningar kan vara orsakade av:

- egenvikt
- termisk expansion
- relaxation
- upphängningsanordningar

Det är vanligt att systemspänningar uppstår på grund av att konstruktionen inte fungerar som det var tänkt på grund av felaktigt justerade eller förslitna



upphängningsanordningar. Snabbstopp och ångslag kan medföra bestående förskjutningar som ger systemspänningar. Om- och tillbyggnader i ångnätet som medför systemspänningar förekommer också relativt frekvent.

Systemspänningar verkar ofta med böjmoment på förgreningspunkter, avstick, in- och utlopp och rörböjar. Systemspänningar kan även verka med axiella dragspänningar på rörkomponenterna. Sådana, sekundära, spänningar kan relaxera genom krypning varvid den elastiska spänningen och töjningen sjunker och, vad gäller töjningen, omvandlas till en permanent kryptöjning.

Även det inre övertrycket kan ge en förlängning av en rörsektion som ger reaktionskrafter på rörväggarna i närliggande rörsegment där rören ändrar riktning. Detta kan ge betydande systemspänningar i rørsystem med liten flexibilitet (Ware 1982).

Med systemspänningar utsätts ångledningar således för lokala spänningskoncentrationer vilket resulterar i lokalt förhöjd kryptöjning som i sin tur kan leda till krypsprickor. Töjningsförloppet och skadebildningen beror på systemspänningarnas storlek och den tid de får verka. Dessutom inverkar, som på alla kryppåkända komponenter, det lokala spänningstillståndet, kryprelaxationer samt materialets krypegenskaper i fråga om krypduktilitet, kryptöjningsmotstånd och krypbrottgräns på skadebildningen, se vidare avsnitt 1.5.2.

#### *Kritiska komponenter*

Systemspänningar och accelererad skadeutveckling kan uppstå i alla typer av ångledningssystem. Att genom provning systematiskt kartlägga en ånglednings tillstånd är ett stort företag, särskilt för komplicerade ångledningssystem. Det är därför vanligt att ett urval av ångledningens komponenter undersöks. Om betydande skador eller materialdegenerering kan konstateras, utvidgas undersökningarna. Urval av och antal komponenter som skall undersökas kan ske på grundval av:

- erfarenheter
- tidigare undersökningar
- drifthistorik (inklusive eventuella avvikelser från nominell drifthistorik)
- eventuell skadehistorik
- beräkningar.

Beräkningar måste utföras med relevanta modeller och på ett relevant underlag för att vara tillförlitliga. Med en analys som kan beakta krypning finns det då möjlighet att bestämma i) kritiska provpositioner och ii) kryptöjning som funktion av tid vid olika positioner genom att studera inverkan av expansion och kryprelaxation samt upprepningar av dessa hos en ångledning i drift. Kvaliteten på den information om systemet som finns att tillgå och hur omsorgsfull analys som görs är avgörande för precisionsnivån vid ett urval av kritiska positioner där undersökningar ska utföras.

Vid en livslängdsanalys av ett ångledningssystem utgör en tillståndsbedömning av systemet en grundpelare. Olika underlag till tillståndsbedömningar kan med avseende på säkerheten i bedömningarna rangordnas enligt följande:

- i) Systematisk undersökning av alla komponenter i systemet.
- ii) Systematisk undersökning av alla komponenter i systemet som erfarenhetsmässigt kan vara kritiska.

- iii) Ett urval av komponenterna i systemet med stöd av kvalificerade erfarenheter och beräkningar.
- iv) Ett urval av komponenterna i systemet med stöd av kvalificerade erfarenheter och enklare beräkningar.
- v) Ett urval av komponenterna i systemet med stöd av kvalificerade erfarenheter eller kvalificerade beräkningar.
- vi) Ett urval av komponenterna i systemet med stöd av överslagsberäkningar.
- vii) Ett urval av komponenterna i systemet.

De tre lägst rangordnade underlagen riskerar ge vilseledande grunder för bedömningar. Om de undersökta komponenterna inte visar skador eller små skadeförekomster ligger det nära till hands att dra slutsatsen att övriga komponenter i stort sätt bör vara skadefria och inte behöver undersökas. Risker är då stora att de mest kritiska komponenterna inte tas med i undersökningarna och att sprickor som finns eller uppkommer inte detekteras i tid.

De två högst rangordnade underlagen kan, åtminstone för ångledningssystem med många komponenter, vara besvärliga eller omöjliga att hinna med att ta fram under en revisionsperiod. Väljs en sådan strategi rekommenderas en god framförhållning. Kartläggningen kan genomföras under fler än ett tillfälle där inledande undersökningar utförs på ett omsorgsfullt urval.

Krav på att med säkerhet identifiera kritiska komponenter med analyser och beräkningar kan inte alltid uppfyllas på grund av att underlaget bristfälligt. Omfattande provning försvåras om revisionsperioden är kort. Allt kortare revisionsperioder är en trend anläggningar som endast har driftstopp på ett fåtal veckor om året börjar bli vanligt förekommande.

Under 1990-talet har därför en stark utveckling skett att finna metoder för att kontinuerligt i drift eller intermittent kunna övervaka komponenter i system med avseende på skadeutveckling och livslängdsförbrukning. I Värmeforskrapport 587 (Storesund 1996) finns exempel på sådana metoder beskrivna. För ångledningar har det riktats särskilt intresse för metoder att kunna övervaka kryptöjning. Ännu har dock inga sådana metoder etablerats.

För att ha kontroll över ett ångsystem är det väsentligt att övervaka:

- temperatur
- tryck
- rörelser och förskjutningar i systemet
- sprickbildning
- mikrostruktur

Övervakning av rörelser och förskjutningar i systemet är inte allmänt etablerad. Relativt enkel utrustning för detta finns dock att tillgå (Roos 1996) och sådan information är väsentlig för att kunna identifiera kritiska delar av systemet.

För att övervakningen skall vara riktig gäller det att mätningar görs på rätt ställen. Ett problem kan vara att önskvärda positioner inte alltid är åtkomliga. Kontinuerliga övervakningssystem kan medföra alltför stora mängder data som i längden blir svårhanterliga. Det är därför klokt att redan från början se till att lagra informationen rationellt så att den sedan enkelt kan utnyttjas på rätt sätt.

### Material

För krypdimensionerade ångledningar används vanligtvis varmhållfasta stål. Sådana stål är utvecklade för att med hjälp av legeringstillsatser och värmebehandling erhålla en god kryphållfasthet. Kol och kol-manganstål har betydligt lägre kryphållfasthet än de varmhållfasta och används sällan vid temperaturer över 400°C. Vissa typer kan dock användas inom krypområdet vid temperaturer upp till 475°C.

Ångledningar består till de största delarna av rörstål. Formstycken och ventilhus är dock ofta smidda eller gjutna varvid smidesstål respektive gjutstål används. Det finns tre kategorier av varmhållfasta stål: låglegerade, martensitiska (9-12% kromstål) och austenitiska.

De låglegerade varmhållfasta stålen är ferritiska och har legeringstillsatser upp till ett fåtal procent. De har god kryphållfasthet i förhållande till sitt pris och har mycket stor användning. De används upp till ca 550°C.

De martensitiska stålen har kromhalter omkring 12 % och andra legeringstillsatser upp till omkring 1 %. Utvecklingen av nya förbättrade stål har främst skett inom denna kategori. Kromhalten är då 9-12 % och i de flesta fall omkring 9 %. Sådana stål benämns ibland som ferritiska men mikrostrukturen består i de allra flesta fall uteslutande av anlöpt martensit. Genom att använda benämningen 9-12 % kromstål undviks eventuella förvecklingar. Äldre typer, som funnits sedan i slutet av 1960-talet, förekommer inte sällan i svenska anläggningar men är mindre vanliga än i många andra länder. De har betydligt bättre krypegenskaper än de låglegerade stålen men är känsligare med avseende på värmebehandling och sammansättning, vilket kan leda till väsentligt reducerad kryphållfasthet.

De nyutvecklade varianterna av 9-12 % kromstål är generellt lättare att svetsa, något mindre känsliga för avvikelser i värmebehandling, billigare och har dessutom i många avseenden bättre krypegenskaper än de äldre. De har fått stor tillämpning utomlands och i Sverige vid byten av komponenter, byten eller modifieringar av ångledningar och vid nybyggnationer av anläggningar. Erfarenheterna av långa drifttider är av naturliga skäl begränsade för nyutvecklade stål. Krypegenskaperna i svetsar, som har hög skadefrekvens för andra stål, är inte problemfria heller för de nyutvecklade 9-12 % kromstålen. De martensitiska stålen har kapacitet att användas upp till ca 620°C.

Bland austenitiska stål finns många av de stål som i dagligt tal kallas rostfria. Konventionella rostfria och syrafasta stål har goda krypegenskaper och god beständighet mot oxidation. Vid högtemperaturapplikationer brukar man välja varianter med förhöjd kolhalt vilket ger förbättrad varmhållfasthet. Med extra tillsatser av nickel får austenitiska stål ytterligare förbättrade egenskaper vid höga temperaturer. De kan användas vid betydligt högre ångtemperaturer än vad som är möjligt för till exempel låglegerade stål. De har emellertid ingen användning i ångledningar i svenska kraftvärmeverk, bland annat på grund av historiska skäl. En ånglåda av austenitiskt stål havererade i en svensk anläggning i slutet av 1950-talet och därefter har ingen använt sådana material i tjockväggigt gods. Orsaken till skadan, en okontrollerad vattenkemi med alltför höga klorhalter, är emellertid inte svår att bemästra. Då austenitiska stål utnyttjas till sin fulla kapacitet, vilket är önskvärt med tanke på att priset är högt, förbrukas livslängden liksom för andra material. Det finns särskilda problem som kan förkorta livslängden. Till exempel uppstår ofta termisk utmattnings i skarvar mellan austenitiska stål och andra kategorier av varmhållfasta stål på grund av

den relativt stora skillnaden i termisk utvidgningskoefficient. De austenitiska stålen används upp till ca 650°C.

I Tabell 2.2-1 ges legeringsinnehåll och materialbeteckningar för varmhållfasta stål som har eller kan förväntas få betydande användning i svenska anläggningar. Svenska, tyska och amerikanska beteckningar av motsvarande stål anges.

**Tabell 2.2-1 Legeringsinnehåll och beteckning för vanliga material i ångledningar.**

| Kategori              | Legering                    | Svensk beteckning | Tysk beteckning  | Amerikansk beteckning                 |
|-----------------------|-----------------------------|-------------------|------------------|---------------------------------------|
| Låglegerade rörstål   | 0,5%Cr 0,5%Mo<br>0,25%V     |                   | 14MoV6 3         |                                       |
|                       | 1%Cr 0,5%Mo                 | SS-stål<br>2216   | 13CrMo4 4        | P12                                   |
|                       | 2,25%Cr 1%Mo                | SS-stål<br>2218   | 10CrMo9 10       | P22                                   |
| Låglegerade gjutstål  | 1%Cr 0,5%Mo                 | SS-stål<br>2223   | GS-17CrMo5 5     |                                       |
|                       | 2,25%Cr 1%Mo                | SS-stål<br>2224   | GS-18CrMo9<br>10 |                                       |
| 9-12% Cr<br>rörstål   | 12%Cr 1%Mo<br>0,5%Ni, 0,3%V |                   | X20CrMoV12 1     |                                       |
|                       | 9%Cr 1%Mo 0,2%V 0,08%Nb     |                   | X10CrMoVNb9<br>1 | P91                                   |
|                       | 9%Cr0,5%Mo1,8%W0,05%Nb0,2%V |                   |                  | P92 (Japansk<br>beteckning:<br>Nf616) |
| 9-12%Cr<br>smidesstål | 9%Cr 1%Mo 0,2%V 0,08%Nb     |                   |                  | F91                                   |

### 2.2.2 Upphängningsanordningar

Upphängningsanordningar indelas vanligen i två huvudgrupper:

1. Hängare med konstant lyftkraft, konstanthängare
2. Hängare med variabel längd, fjäderhängare

Normalt utnyttjas i stor utsträckning hängare med variabel längd, till exempel så kallade proportionelhängare. Det ger en viss rörelsefrihet för att ta ned belastningar på rörsystemet. Därtill kan glidstöd förekomma som begränsar rörelser till en riktning. Andra stöd begränsar rörelser till ett plan. Ångledningen hålls fixerad vid in- och

utlopp och det kan finnas ytterligare sådana positioner. En omsorgsfull uppsikt på upphängningsanordningarna är en förutsättning för att inte riskera att allvarliga systemspänningar uppstår. Utgångspunkten är den tillgängliga dokumentationen på ångledningens upphängning vid byggnationen. Önskvärt är information om:

- i) eventuellt införande av förspänningar innan systemet sattes i drift;
- ii) inställningar av upphängningsanordningar;
- iii) beräkningar för inställningar och eventuella förspänningar;
- iv) positionsangivelser av ångledningen

Fjäderhängare är oftast förbundna till ångledningen med klamrar som är hopskruvade med bultar. Det förekommer även att det ingår stag i förbandet som är fastsvetsade på ångledningen.

Praktiska erfarenheter av installation och drift av fjäder och konstanthängare finns beskrivet av Hardke och Becker (Hardke 1991)

#### 2.2.2.1 Skador i upphängningsanordningar

Med anknytning till långa drifttider bör följande typer av skador uppmärksammas:

- i) relaxation av fjädrar i fjäderhängare
- ii) friktion i konstanthängare
- iii) deformationer i upphängningsanordningar
- iv) deformation och förslitning av glidstöd och andra stöd så att de inte fyller sin funktion

Deformationer av hängare och stöd kan till exempel uppstå i samband med snabbstopp och provtryckning. Deformationer kan även uppstå i hängare under den kontinuerliga driften. Inte minst krypdeformationer på grund av att hängarens konstruktion och dess material inte är tillräckligt hållfasta i de delar som utsätts för höga temperaturer, bör uppmärksammas. Det har även förekommit att upphängningar i ett system har varit tillverkade av material som inte varit avsedda för de temperaturer de utsatts för med brott som följd. Även kryprelaxeringar (**se avsnitt 1.5.2**) i systemet kan ge omfördelningar av lasterna som inverkar skadligt på hängare och stöd.

Förspänningskraften i bultar relaxerar genom krypning vid höga temperaturer. Detta kan resultera i att hängarens förband till ångledningen lossnar och att systemspänningarna ökar.

Fjädrar i fjäderhängare relaxerar i drift vilket påverkar fjäderkonstanten. Kompensationer av detta fenomen genom att justera inställningarna finns inte etablerade. Har fjädrarna bottnat är hängaren satt ur funktion.

Konstanthängare kan ha för stor friktion eller fastna. En friktion på  $\pm 5\%$  är den högsta tillåtna enligt tyska riktlinjer (VGB R 510 L).

#### 2.2.2.2 Provnings och övervakning av upphängningsanordningar

Visuell kontroll av upphängningsanordningar bör ske regelbundet och efter onormala påkänningar som till exempel snabbstopp, ångslag samt före och efter provtryckningar.

Det är särskilt viktigt att utföra kontroller efter ett halvt till ett års drift efter att en ny ångledning tagits i drift eller efter att komponenter eller delar av systemet bytts ut. Kontrollerna kan indelas i sådana som kan göras utan att ångledningens isolering tas av och sådana som kräver avisolering. Lämpliga regelbundna intervall är två gånger om året.

Kontroller utan avisolering ger begränsad information om upphängningarnas tillstånd. Vid översyn av hängarnas inställningar bör man vara uppmärksam på att riktiga inställningar inte borgar för att ångledningen är riktigt upphängd eftersom hängarna kan ha skadats eller förslitits innanför isoleringen. Lämpliga uppmätningar rekommenderas för att avgöra om eventuella förskjutningar uppstått. Ångledningen kan även lägesbestämmas. Sådana undersökningar utförs med hänsyn till eventuella tidigare uppmätningar för att möjliggöra jämförelser.

En lägesbestämning av ångledningen kan vara befogad om skadliga förskjutningar befaras eller kan observeras. Lägesbestämningar kan utföras med indirekta metoder utan avisolering och bör utföras både på kall och på varm ångledning. Uppmätning för lägesbestämning kan göras direkt på ångledningen om den avisoleras. Sådana mätningar blir mer precisa. Faktorer som erforderlig precision, möjligheter att utföra mätningar på varma ledningar, kostnader för avisolering och tidsåtgång inverkar på hur mätningarna på lämpligaste sätt ska utföras.

Vid en visuell kontroll av fjäderhängare kan det avgöras om fjädrar har relaxerat. Signifikant relaxerade fjädrar byts ut. Om mindre relaxering observeras kan det rekommenderas att först utvärdera hur stor inverkan de kan ha på en ökning av systemspänningarna för att sedan kunna avgöra om de bör bytas ut.

Det kan vara möjligt att beräkna eller uppskatta fjäderkonstanten i en fjäderhängare. Tillförlitligheten i sådana beräkningar eller uppskattningar beror på det tillgängliga underlaget av fjäderns design och påkänningar. En alternativ kontroll är att demontera och prova fjädern för att beräkna fjäderkonstanten och jämföra med den ursprungliga. Ett representativt antal fjädrar för ångledningen bör i så fall undersökas.

Säkra måttbestämningar och kontroll av hängarens förband till ångledningen kräver avisolering. Följande kontroller rekommenderas:

- i) Klamrar kontrolleras visuellt med avseende på deformationer och med MT med avseende på sprickbildning. Replikprovning rekommenderas på mindre sprickindikationer som inte tveklöst innebär att bygeln bör bytas ut.
- ii) Svetsade stag på ångledningen har inte sällan sprickor i svetsarna och bör MT-provas. I fall av indikationer rekommenderas komplettering med replikprovning.
- iii) Bultar kontrolleras att de är riktigt åtdragna.
- iv) Längden av hållstänger och andra delar som kan deformeras mäts upp i syfte att kontrollera eventuella förlängningar.
- v) Friktionen i konstanthängare mäts upp.

#### 2.2.2.3 Återstående livslängd hos upphängningsanordningar

Det är av vital betydelse att upphängningsanordningarna fyller sin fulla funktion. En frågeställning är vilken grad av förslitning som kan accepteras. En annan frågeställning är om och hur man kan förutsäga när förslitningen nått ned till acceptansnivån. För

upphängningsanordningar har följande typer av förutsättningar stor betydelse för svaren på dessa frågeställningar:

- i) Beräkningar av reaktionskrafter och systemspänningar i ångledningen. Behov av sådana beräkningar uppstår om förväntade spänningsomlagringar i samband med kryprelaxeringar i systemet kan befaras vara betydande, om förskjutningar i systemet har observerats och om kritiska komponenter skall identifieras. Beräkningarna kan göras med utgångspunkt från upphängningars inställning då anläggningen togs i drift kompletterat med senare uppmätningar. Skiljer sig ångledningens verkliga position från den som beräkningarna grundar sig på blir beräkningsresultaten felaktiga.
- ii) Möjligheten att bestämma och mäta hur stora deformationer hos hängare och stöd, relaxeringar hos fjäderhängare samt friktioner hos konstanthängare som inte ger signifikant inverkan på reaktionskrafter.
- iii) Möjligheten att avgöra orsaken till en observerad förslitning. Om förslitningen är orsakad av en tillfällig händelse kan fortsatt förslitning bedömas från förutsättningarna för kommande liknande händelser.
- iv) Krypskador. Om replikprovning utförs och krypskador påträffas i form av kavitetsbildning kan skadeutvecklingen övervakas med återinspektioner enligt rekommenderade intervall, se avsnitt 1.6.6.

Förutsättningarna ovan understryker att inspektion och provning av upphängningsanordningarna har stor betydelse, inte bara för att kunna bedöma tillstånd och förutsägelser om den återstående livslängden hos dessa, utan framförallt för tillståndet hos ångledningen i sin helhet.

Varje ångledning har sina förutsättningar vilka bör analyseras. En sådan analys kan ske med stöd av punkterna ovan. Utöver tillgänglig information om upphängningsanordningarnas egenskaper, inställningar och positioner vid driftstart måste det även uppmärksammas vad eventuella ombyggen, tillbyggen och komponentbyten på ångledningen inneburit för upphängningsanordningarna. Inverkan från driftstörningar, omfattning och resultat av tidigare provning samt olika åtgärder som till exempel ändrade inställningar av hängare måste beaktas i analysen.

Oavsett av hur mycket det går att få ut från det underlag som finns om en ånglednings upphängningsanordningar och de insatser som görs för att analysera detta underlag så kan det rekommenderas att inspektera upphängningsanordningarna enligt beskrivningarna ovan på en ångledning som är föremål för en tillståndsanalys eller en analys av den återstående livslängden på grund av följande skäl:

- i) Resultaten av inspektionerna kan användas till att identifiera kritiska komponenter.
- ii) Observationer av eventuella krypskador på ångledningen kan förklaras närmare.
- iii) Eventuella osäkerheter vid en prediktering av den återstående livslängden hos en ångledning kan minskas avsevärt.
- iv) Dokumenterat väl fungerande upphängningsanordningar innebär goda förutsättningar till att planera framtida användning av systemet på säkra grunder.



Andra delar av en livslängdsanalys av upphängningarna i sig och i att forma utgångspunkten för en analys av den återstående livslängden av hela systemet är att sammanställa tillgängligt underlag om upphängningarnas historia och att utvärdera detta. Följande faktorer kan påverka omfattningen och strategin för livslängdsarbetet med upphängningar och ångledningssystem:

- i) Mål för anläggningens framtida användning som ångledningssystemen skall svara mot.
- ii) Upphängningarnas antal och ångledningens komplexitet.
- iii) Omfattning och resultat av eventuella tidigare undersökningar och åtgärder.

Livslängdsprediktering av en individuell upphängning innebär en prediktering av hur länge till den kan förväntas upprätthålla sin fulla funktion. För en driftspåkänd upphängning som har undersökts kan predikteringar göras med hänsyn till omfattning och resultat av undersökningarna enligt följande:

*Upphängningen är utan anmärkning efter att ha undersökts med hänsyn till att kunna upptäcka den förslitning och de skador som kan befaras. Detaljer som till exempel fjädrar kan förväntas att förr eller senare degenereras i drift och återkommande kontroller skall utföras regelbundet, se **avsnitt 2.2.2.2**. Inspektion i avisolerat tillstånd bör genomföras högst vart 6:e år. Varje förändring av drifttillståndet utanför ramarna av tidigare drift föranleder en utvärdering av eventuell inverkan på upphängningen.*

*Upphängningen har förslitits eller skadats till en grad som är mindre än vad som kan tillåtas. Den återstående livslängden är begränsad och den uppnådda förslitningen eller skadebildningen i förhållande till den tillåtna analyseras och bedöms i termer av förbrukad livslängd. Utöver regelbundna kontroller rekommenderas inspektion i avisolerat tillstånd utföras högst efter halva den tid som kan bedömas utgöra den återstående livslängden.*

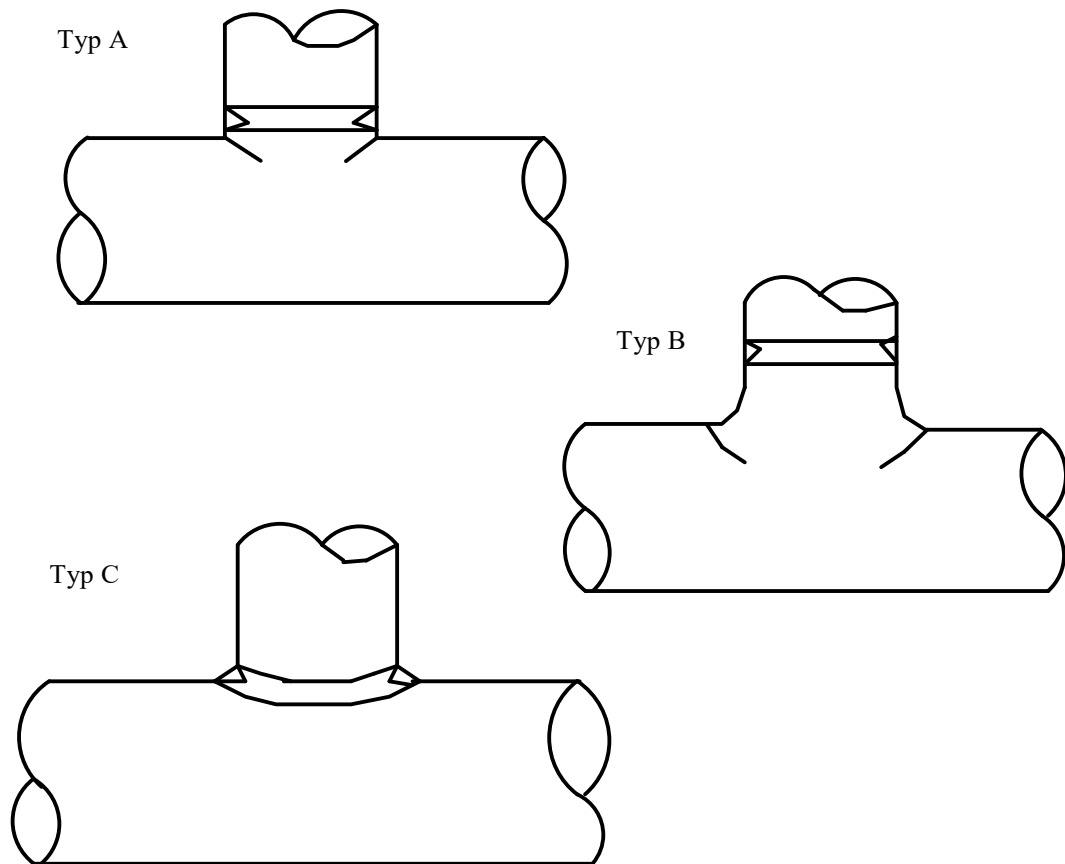
*Upphängningen har förslitits eller skadats i paritet med eller mer än vad som kan tillåtas. Upphängningen byts ut eller renoveras om så är mer lämpligt. Om en temporär fortsatt användning övervägs bör det beaktas vilka konsekvenser och andra åtgärder det kan komma att innebära.*

Upphängningen har förslitits eller skadats samtidigt som någon accepterad grad av förslitningen eller skadan inte kan avgöras. Byte eller eventuell renovering av upphängningen rekommenderas.

### 2.2.3 Formstycken

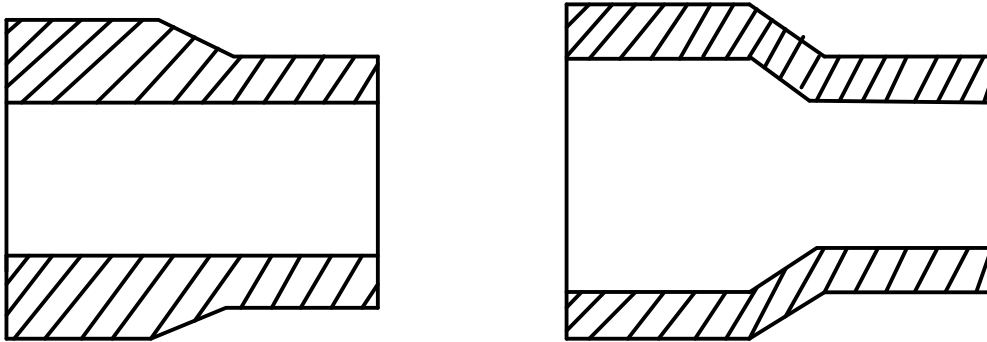
Knutpunkter på ångledningen utgörs av formstycken. Den vanligaste typen är så kallade T-stycken. Andra typer är byxrör, även kallade Y-stycken, och klotformstycken. De sistnämnda är inte vanliga i svenska anläggningar. T-stycken är ofta tillverkade av valsade rörämnen som är hopsvetsade med eller utan en smidd uppkragning. Hela smiden och även gjutna T-stycken förekommer. De andra typerna av formstycken är oftast smidda. Formstycken där rörets dimension ändras kallas reduktionsstycken. Figur 2.2-2 och 2.2-3 visar några olika konstruktionslösningar av T-stycken respektive reduktionsstycken. Vanligtvis innebär en diameterändring i komponenten en ändring av godstjockleken.

Spänningskoncentrationer uppstår vid stutsanslutningar och i områden där diametrar och godstjocklekar ändras. Särskilt utsatta för krypning är ofta de så kallade sadelpunkterna i T-stycken. En stutsanslutning med en större diameter ger högre spänningar än en mindre. Svetsar och särskilt värmepåverkade zoner är i regel mer känsliga för krypskador än grundmaterialet, se **avsnitt 2.2.6**, och placering av svetsar i områden med spänningskoncentrationer medför en ytterligare reducerad livslängd. Både svetsrågar och rotvulster bör slipas bort vid tillverkningen för att minska spänningskoncentrationer. Detta är emellertid inte alltid utfört, åtminstone inte då det gäller rotvulster.



Figur 2.2-2 Olika konstruktionslösningar av T-stycken.

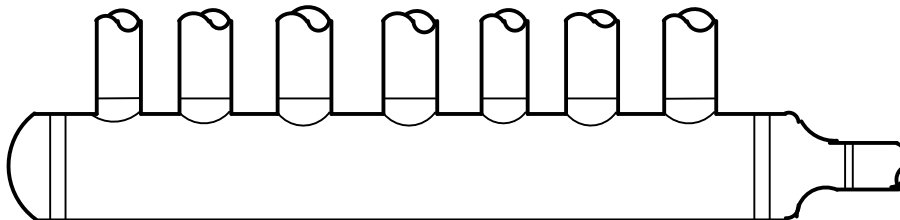
Figure 2.2-.2 Examples of designs of T-joints.



Figur 2.2-3 Olika utformningar av reduktionsstycken.

Figure 2.2-3 Examples of design of reduction pieces.

I vissa ångledningssystem förekommer även ånglådor där ånga från flera ångledningar kan samlas och fördelas. Figur 2.2-4 visar ett exempel på en sådan ånglåda. På varje ledning finns en ventil intill lådan (kryss i figuren). Ånglådor är ofta tillverkade av ett valsat rörämne med påsvetsade gavlar som kan vara plana eller koniska. De koniska ger gynnsammare spänningsfördelningar. Utformningen där rören ansluter till lådan kan variera på ett liknande sätt som för T-stycken, se Figur 2.2-2.



Figur 2.2-4 Exempel på en ånglåda i ett ångledningssystem.

Figure 2.2-4 Example of a header in a pipe work.

### 2.2.3.1 Skador i formstycken

#### Typiska skademekanismer

Formstycken drabbas främst av krypskador, se **avsnitt 1.5.2**. Termiska utmattningskador (**avsnitt 1.5.1.3**) kan uppstå men har inte varit vanligt förekommande. Detta har sin förklaring i att sådana skador är förknippade med ett större antal termiska cykler och kraftigare gradienter i godstjocklek än vad som vanligen förekommer för formstycken. Dagens anläggningar är i de allra flesta fall dimensionerade för en baslast och har i stor utsträckning även använts på detta sätt. Antalet starter och stopp är relativt litet. Formstycken är ofta utformade utan dramatiska gradienter i godstjockleken. Under senare år har cyklisk drift blivit vanligare och med tiden befaras detta kunna leda till ökad skadebildning genom

kryputmattning. Det finns några erfarenheter av att införandet av cyklisk drift har medfört oväntad stor krypskadeutveckling vid kritiska positioner i ångledningssystem. Det skulle alltså vara fråga om en ökad ackumulering av kryptöjning eller krypdominerad kryputmattning som följd av den ökade frekvensen driftcykler. Fördjupning i ämnet finns i Värmeforskrapport 1178 (Storesund 2011).

Om ett ökat inslag av cyklisk drift planeras för en anläggning kan det därför rekommenderas att se över formstyckenas design, hur den ökade frekvensen av termiska cykler och lastcykler kan inverka samt termiska förlopp och lastförlopp under cyklingen i syfte att analysera riskerna för termiska och termomekaniska utmattningsskador. Dessutom bör eventuella snabbstopp och risken för framtida snabbstopp uppmärksammas. Effekterna av ett snabbstopp kan vara mycket större än ett kontrollerat stopp.

Kryputmattning är en samverkan mellan krypning och termisk utmattning, se vidare avsnitt 1.5.1.4. Forskningsresultat på låglegerade varmhållfasta rörstål har visat att:

- mekanismerna tenderar att tävla mot varandra då krypskadan är liten
- mekanismerna samverkar då krypskadan är stor.
- som ovan nämnts är det risk för att cyklisk drift kan medföra en ackumulering av kryptöjning som är kopplad till frekvensen driftcykler vid kritiska positioner.

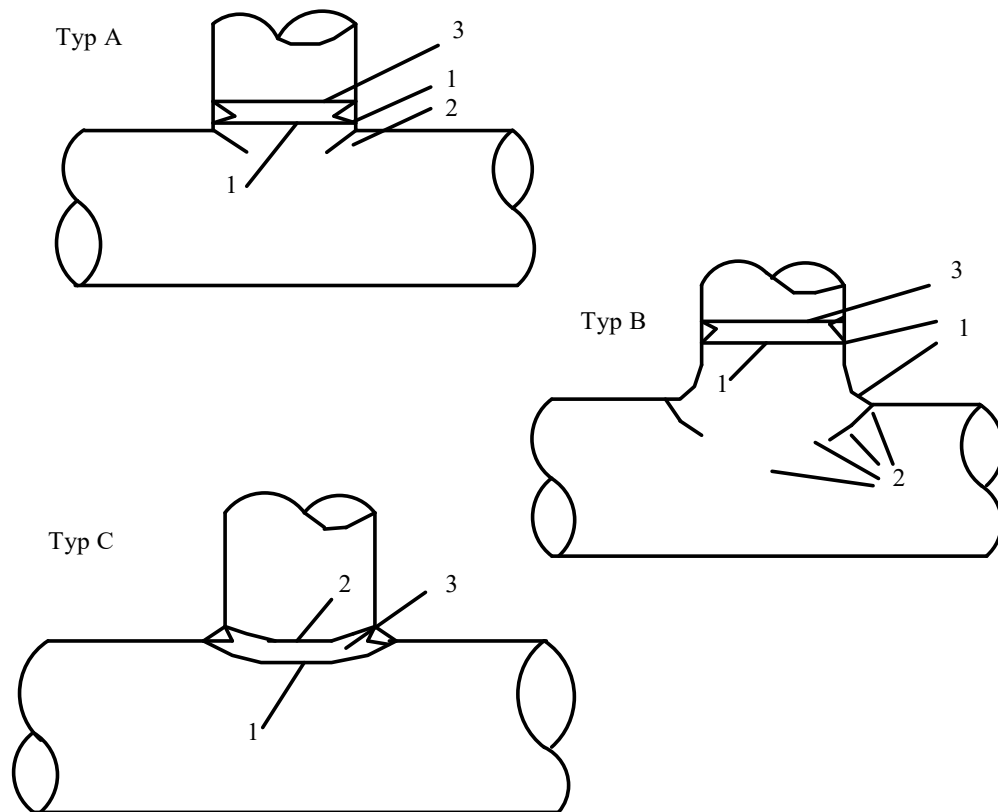
Detta innebär att man i fall av cyklisk drift bör vara extra uppmärksam om krypskador har observerats i formstycket som i sig bedöms att kunna utvecklas till sprickor inom en begränsad eller relativt kort tid.

Metoder för att analysera inverkan av cyklisk drift på livslängden hos en ångledning har utvecklats i Värmeforskningsprojekt M12-218 (Storesund 2015). Genom en sådan analys kan också lämpliga inspektionsintervall bestämmas.

#### *Lokalisering av skador*

Som det har framgått i **avsnitten 2.2.1 Allmänt om ångledningar** och **2.2.3 Formstycken**, så uppstår spänningskoncentrationer på grund av systemspänningar och den geometriska utformningen av formstycket. Krypskador uppstår i första hand i områden med spänningskoncentrationer och i svetsar. Systemspänningar har ofta relativt stor verkan på delar av formstycket där geometriska spänningskoncentrationer och svetsar är belägna. Under sådana förhållanden kan krypskador uppstå efter kort tid i förhållande till den dimensionerade livslängden och relativt snabbt utvecklas till krypsprickor.

Figur 2.2-5 visar T-styckena från Figur 2.2-2 där de känsligaste områdena för krypskador är markerade i rangordning 1-3. I exempel a) har ämnet kragats något och i exempel b) i större utsträckning för att kunna placera svetsen ifrån områden där höga spänningskoncentrationer uppstår och där eventuella systemspänningar har störst verkan. Exempel c) har trots detta blivit den vanligaste typen eftersom den är lättast att tillverka. Här sammanfaller svetsen med de högsta spänningsnivåerna medförande reducerad kryplivslängd. Smidda komponenter kan ha former som mer eller mindre avviker från formerna av sammansatta rör. För mer avvikande former kan särskilda spänningsanalyser behövas för att identifiera områden där spänningskoncentrationer uppstår.



**Figur 2.2-5** Kritiska positioner för krypskador i T-stycken.

**Figure 2.2-5** Critical positions for creep damage in T-joints.

Generellt uppträder de största krypskadorna vid ytterdiametern på ett trycksatt rör eftersom den tangentiella spänningen avtar något mot innerdiametern. Vissa utföranden av rundsvetsar kan dock innebära att krypskador börjar utvecklas strax under ytterytan. I ett formstycke kan även av geometrin betingade spänningskoncentrationer vara större mot komponentens innerdiameter. Detta gäller vid rätvinkliga positioner på ett T-styckes utgrening (se Figur 2.2-5).

Systemspänningar som innebär böjpåkänningar resulterar i att krypskador börjar utvecklas från utsidan där dragspänningarna är störst.

Även utan böjpåkänningar förekommer lokala variationer i grad av skada, till exempel runt en svets. Detta gäller vid senare stadier av krypskadeutvecklingen då stråkbildning av kaviteter och mikrosprickor bildas. Erfarenheterna har visat att krypskadeutvecklingen då till sin natur inte alltid är kontinuerlig och likartad i ett större område med likadant spänningstillstånd.

Andra skador som bör uppmärksammas är svetsdefekter. Det är till exempel vanligt att inre bindfel gått igenom tillverkningskontroller oupptäckta men upptäcks vid tillståndsundersökningar. De kan sedan initiera krypsprickpropagering och i värsta fall allvarligt haveri (vilket har hänt).

### 2.2.3.2 Provnings av formstycken

*Magnetpulverprovning* (MT, se **avsnitt 1.6.1**) används rutinmässigt för kontroll av ytbrytande sprickor och defekter. Alla svetsar och områden där det finns risk för krypskador undersöks, se exemplet i Figur 2.2-4. Provade ytor rekommenderas vara omsorgsfullt avslipade, se **avsnitt 1.6.1**. Penetrantprovning (PT, **avsnitt 1.6.2**) kan vara ett alternativ men är inte tillräddig eftersom oxidfyllda sprickor och defekter inte detekteras. Fluorescerande varianter av provningen har tillämpning för bättre känslighet. De ställer dock större krav på förarbete och kringutrustning.

Med MT finns det även möjligheter att upptäcka sprickor och defekter strax under ytan vilket kan utnyttjas till att upptäcka krypsprickor och återvärmningssprickor som i vissa fall kan initieras där. Villkoren för att kunna finna sådana skador bör i så fall utstuderas innan provningen vidtas.

Oavsett vilka andra metoder som används vid provning av formstycken kan de inte ersätta MT.

*Replikprovning* (**avsnitt 1.6.6**) har en omfattande användning för att undersöka mikrostrukturer och eventuella krypskador hos formstycken. Resultaten används till att bedöma tillståndet och den återstående livslängden. Metodik och rekommendationer för provningens utförande har utarbetats inom Värmeforsk (Wu 1997), (Storesund 2000). Ett replikprov utgör ett avtryck av en metallografiskt preparerad yta som i regel är liten. För att erhålla ett representativt underlag krävs det därför ett antal prover inom de aktuella områdena. Replikprovning används även i syfte att identifiera typ av skada eller defekt vid MT-indikationer.

Utöver de ovan refererade Värmeforskrapporterna beskrivs positioner för replikprovning av formstycken i dokument utgivna av VGB (VGB-R 509 L 1984) och Nordtest (NT NDT010 1991). Det är viktigt att identifiera de riktningar som böjningar från systemspänningar kan verka på formstycket och anpassa de positionerna runt omkretsen som ska undersökas efter detta.

Alla svetsar i formstycket bör undersökas vid replikprovning. Svetsar vid liv, geometri- och dimensionsändringar har ofta förhöjda skadefrekvenser men det utesluter inte skador även i andra svetsar. Replikprovning av svetsar behandlas närmare i **avsnitt 2.2.6.2**. Replikprovning ger information om mikrostrukturen och materialtillståndet på komponentens ytteryta. Uppskattningar av skadefördelningen i tjockleksriktningen kan göras i många fall. Detta kräver utöver kvalificerade undersökningar kunskap och erfarenheter av liknande fall.

*Ultraljudprovning* (UT, se **avsnitt 1.6.3**) har stor användning för att finna inre sprickor och defekter samt sådana som är ytbrytande på motsatta sidan av godset i många typer av komponenter och i olika typer av industrianläggningar. Svetsar är ofta föremål för UT, vilket också tillämpas på ångledningar och sådana i formstycken. Syftet är då i första hand att detektera svetsdefekter. Metoder för att detektera termiska utmattningsprickor finns utvecklade främst för ånglådor där sådana skador är vanliga (Storesund 1996). Speciellt utvecklad metodik kan även krävas för att undersöka ett formstycke. Som det har nämnts i avsnitt 2.2.3.1 kan det under framtida driftvillkor finnas större risker med termisk utmattnings i formstycken och ett större behov av anpassad UT.

Konventionell och automatiserad UT har ibland tillämpats för att detektera krypskador och krypsprickor. Förfinade tolkningar av indikationer från sådan provning har ännu

inte etablerats och det kan därför rekommenderas att dra försiktiga slutsatser av resultaten. Under 1980-talet och 1990-talets början pågick särskilt i Tyskland forskning på att karaktärisera krypskador med hjälp av diffraktionsteknik vid ultraljudprovningen. Resultaten var lovande på grundmaterial i laboratoriemiljö men gav lägre tillförlitlighet ute i fält. Metoden kan dock användas till att identifiera mikrosprickor.

*Virvelströmsprovning* (ET, se **avsnitt 1.6.5**) har, liksom UT med diffraktionsteknik, potential för detektering av sena stadier av krypskador såsom mikrosprickor och eventuellt stråk av krypkaviteter. ET har ingen etablerad användning på formstycken men en utveckling av metoder för att kunna indikera mikrosprickor och kavitetsstråk är önskvärd. De kan inte upptäckas med MT och eftersom de är förknippade med lokala variationer krävs ofta en omfattande replikprovning för att säkerställa att de högsta skadenivåerna hittas vid en undersökning.

Olika metoder för lokal mätning av kryptöjning finns under utveckling eller tidiga kommersiella stadier (Storesund 1996). Den enklaste metoden är att svetsa fast små tappar av till exempel höglegerat stål som inte oxideras och mäta förskjutningar mellan dessa vid avställningar. Precisionen måste vara sådan att töjningar på tiondels procent kan uppmätas för att det ska vara någon större nytta med resultaten. Metoden ger inte information om töjningar som är begränsade i till exempel den värmepåverkade zonen i svetsar men kan som ett komplement till andra undersökningar rekommenderas för allmän övervakning av krypdeformationen i kritiska områden. Lokal töjningsmätning kan utföras med kapacitiva töjningsgivare. Sådana har utprovats under många år och de kan användas vid typisk drifttemperatur på 540°C i ca 20 000 timmar. De har inte någon utbredd användning men har haft framgångsrik tillämpning för särskilda behov.

Om sprickor eller defekter påträffas är det brukligt att avlägsna dessa. Detta är inte alltid den bästa lösningen. En storleksbestämning av sprickan eller defekten kan vara befogad innan vidare åtgärder beslutas. Detta kan utföras med ultraljudmetoder, se **avsnitt 1.6.3**, och spänningsfallsmetoder (potential drop - PD) (Wortel 1995). Båda typerna är dock förknippade med osäkerheter vilka måste beaktas. Säkerhetstillägg på uppmätta sprickdjup kan behöva tillämpas vid analyser av resultaten.

Förstörande mekanisk provning tillämpas för att kunna kvantifiera materialets degenerering i ett formstycke. Komponenten måste då repareras eller bytas. Provningsen kan vara speciellt befogad om det uttagna materialet kan representera komponenten i övrigt eller andra komponenter av ångledningen. För att kunna uppnå representativa resultat bör syftet med provningen och det uttagna materialets position noggrant identifieras. Vilka slutsatser som kan dras utifrån de analysmetoder som står till förfogande för provningen bör även klargöras. Provnings av slagseghet, krypsprickpropagering och kryphållfasthet kan vara relevant för formstycken, se vidare **avsnitten 1.7.5, 1.7.6** respektive **1.7.7**.

Krypprovning med miniatyrprovstavar har tillämpning på formstycken. Den erforderliga materialmängden för provningen är relativt liten och kan innebära att en svetsreparation inte är nödvändig. En fara kan vara att material tas ut från positioner som inte behöver repareras men som då heller inte representerar komponentens tillstånd.

Små materialmängder kan även tas ut för kemisk analys, metallografisk undersökning och hårdhetsmätning. Metoder för materialuttag och kemisk analys ges i **avsnitt 1.7.1**



respektive **1.7.2**. Metallografisk undersökning och hårdhetsmätning beskrivs i **avsnitt 1.7.3** respektive **1.7.8**.

Det finns en provmetod, small punch testing (SP), där materialuttaget är så litet, ca 2 mm djupa skivor tas ut med specialkonstruerade apparater, att den kan betraktas som oförstörande. SP kan tillämpas för krypprovning och denna tillämpning är under utveckling för kommersiellt bruk och förväntas kunna användas bland annat på formstycken (Parker 1998b, Tettamani 1998). En annan metod som kräver lika lite materialuttag är impression creep (IC) testing (Rantala 2013). Här trycks en stämpel in i materialprovet med konstant last. Det är fråga om mycket små intryck genom krypning. Metoden, som kan förefalla vara enkel, kräver alltså mycket noggrann temperaturkontroll och utrustning med hög precision. Det begränsade materialuttag medför att lokala krypegenskaper kan bestämmas, t.ex. HAZ och till och med olika delar av HAZ. En nackdel med provningen är att man inte kan ta fram förlängningsvärden.

Annan provning som kan vara befogad på formstycken är godstjockleksmätning (**avsnitt 1.6.3.3**), till exempel om uppgifter om godstjocklekar är osäkra i kritiska områden av formstycket. Rekommenderade positioner för sådan provning ges till exempel i VGB R 509-L.

*Sammanfattningsvis* kan det sägas att en kombination av olika provningsmetoder är att rekommendera. Spricksökning med MT (**avsnitt 1.6.1**) är grundläggande och skall alltid utföras.

Komplement med UT (**avsnitt 1.6.3**) är i många fall befogade men begränsningar för den metodik som tillämpas i det aktuella fallet måste beaktas.

Metallografisk undersökning med replikprovning (**avsnitt 1.6.6**) är sedan den mest etablerade metoden för att utvärdera materialets tillstånd.

Hårdhetsmätning med fältutrustning (**avsnitt 1.6.8**) kan ge värdefull kompletterande information.

Registrering av lokala töjningar kan göras som komplement men metoder för övervakning av kryptöjningen som skulle kunna ersätta replikprovning är inte väletablerade. I speciella fall kan dock sådana metoder vara motiverade, till exempel på T-stycken där svetsar är placerade vid sadelpunkterna.

Förstörande och inte minst semi-förstörande provning kan vara motiverad. Det är då viktigt att utvärdera vad den provning som kan utföras kommer att kunna representera vid en analys av komponentens återstående livslängd. Provningsmetoder som kan ha tillämpning finns beskrivna i **kapitel 1.7**.

#### 2.2.3.3 Återstående livslängd hos formstycken

Möjligheterna till bedömningar av den återstående livslängden grundläggs av hur formstyckets och ångledningssystemets tillstånd har undersökts där replikprovning är ett centralt redskap. Ändringar av framtida driftdata har sannolikt stor betydelse. Den vanligaste formen av förutsägelser är att rekommendera en driftperiod till en återkommande kontroll som beror på eventuella krypskadors utveckling och med hänsyn till driftdata framöver. Tiden till den återkommande kontrollen är vanligen avpassad så att det inte ska vara risk för att krypsprickor, som är indikerbara med MT, påträffas vid detta tillfälle eftersom detta riskerar att medföra omedelbara åtgärder som

äventyrar tillgängligheten. Det förutsätts då att driftdata under den rekommenderade driftperioden inte ger större påkänningar än de som antagits. När skadorna börjar bli kritiska planeras ett utbyte av komponenten i fråga in.

Det finns generella rekommendationer baserade på klassificering av krypskadan i fem klasser som har stor användning, till exempel Nordtest NDT 010 och Nordtest TR 302 där skadeklasserna och underklasser till dessa är tydligt definierade. Erfarenheterna har med tiden visat att de generella rekommenderade tidsintervallen i många fall är mycket konservativa för låga skadeklasser och att de kan vara icke konservativa för de högre. Förfinad klassificering och förfinade rekommendationer har utarbetats på många håll och tillämpas ofta, bland annat sådana som tar speciell hänsyn till svetsar, se **avsnitt 2.2.6.3**. Speciella rekommendationer för formstycken och olika typer av sådana finns inte publicerade.

Tillståndsundersökningar kan avgöra om formstycket har utbredda skador eller om skadan är lokal. Stor utbredning av betydande krypskador innebär ofta att formstycket måste bytas ut efter en begränsad tid. Lokala skador kan i många fall åtgärdas så att formstycket kan användas i flera år till. Förekommer sprickor är då en omsorgsfull utförd svetsreparation motiverad. Svetsreparationer behandlas ingående i Värmeforskrappport 657 (Storesund 1999).

Efter uppföljande undersökningar baseras rekommendationerna på de nya resultaten och på skillnader från de tidigare. För att så säkert som möjligt kunna avgöra skillnader är följande av stor betydelse:

- i) Precis dokumentation av de provade positionerna.
- ii) Provning på samma positioner.
- iii) Samma metoder för provpreparering eller dokumenterat jämförbara metoder för de undersökningar som skall jämföras.

Om sprickor eller andra defekter påträffas är det avgörande att undersöka orsaken till skadan. Tillväxt av krypsprickor kan beräknas med brottmekaniska metoder som till exempel den brittiska R5 metoden (finns beskriven i **kapitel 1.8**). Sådana metoder, vilka innebär att sprickor och andra defekter kan tillåtas kvar om tillräcklig säkerhetsmarginal finns under kommande driftperiod, tillämpas alltmer utomlands. Det är viktigt att kunna ta hänsyn till spänningsfördelningarna i det aktuella formstycket på ett riktigt sätt vid beräkningarna. Dessutom måste sprickans storlek bestämmas. Metoden har haft framgångsrik användning för att avgöra om temporär drift med spricka kan tillåtas eller inte.

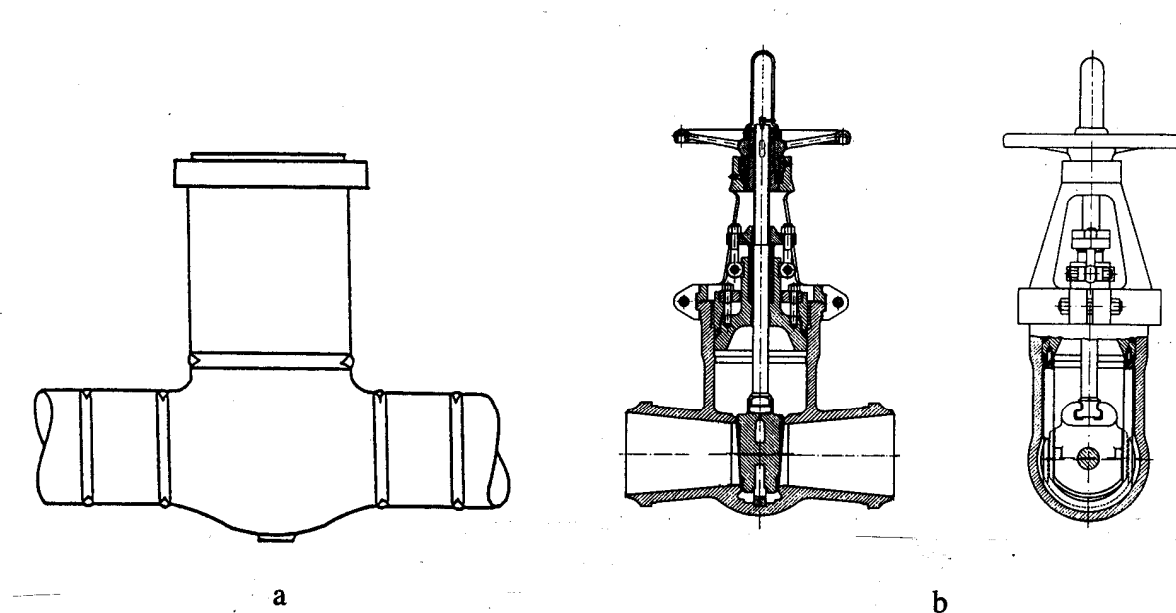
Användningen av brottmekaniska beräkningar kan belysas med följande exempel:

En spricka påträffades i ett formstycke och man var tvungen att besluta om ett byte eller en reparation skulle genomföras. Önskemålet var att kunna fortsätta driften med planerade driftdata till nästa revision. Ett eventuellt byte av formstycket kan då planeras tills dess. Sprickan fastställdes vara en krypspricka med hjälp av replikprovning och sprickdjupet bestämdes sedan genom nedslipning av sprickan. Provning av hela komponentens tillstånd utfördes med repliker innan driftstart efter att sprickan påträffats. Resultaten från replikprovningen visade inga signifikanta krypskador på formstycket i övrigt. Beräkningar utfördes och visade att ytterligare ett års drift inte innebar risk för kritisk tillväxt från den urslipade sprickan. Därför planerades en kvalificerad reparation som utfördes vid följande revision. För säkerhets

skull följs reparationen upp med oförstörande provning under de följande åren men komponenten kan förväntas ha en återstående livslängd i paritet med liknande komponenter på ångledningen som vid undersökningar tillsammans med ångledningen i övrigt hade relativt små krypskador.

#### 2.2.4 Ventiler

Ventiler på ångledningar liknar T-stycken i sin uppbyggnad med uthalsningar och godstjockleksändringar. Ventilhus är gjutna eller smidda. Figur 2.2-6 visar exempel på utformningar av ventiler. Ventiler på ångledningen utförs ofta som kilslidsventiler vilket visas i exempel b) i figuren. Konstruktionen i figuren utnyttjar vid ventilbröstet trycket i ventilen för att få tätning. Packningen har då kunnat elimineras och godsanhopningar har kunnat reduceras.



Figur 2.2-6 Exempel på utformning av ventiler.

Figure 2.2-6 Examples of valve designs.

##### 2.2.4.1 Skador i ventiler

De skador som uppstår i ventilhus är lika de som beskrivs för formstycken och lokaliseringen har likheter med den som uppträder i T-stycken, se **avsnitt 2.2.3.1**. Till skillnad från T-stycken kan det dock inte finnas systemspänningar i form av moment på det ingående påsticket på ledningen som kan orsaka förhöjd skadebildning. Frekvensen av krypskador är ofta lägre för gjutna ventiler i jämförelse med smidda ventiler. Det beror på att godstjocklekarna ofta är överdimensionerade i de gjutna komponenterna. Termiska utmattningsprickor är dock inte ovanliga hos gjutna ventilhus. Detta beror på att utformningen i många fall har skarpa övergångar från stor till liten godstjocklek och skarpa geometriändringar som kan ge betydande töjningseffekter av termiska gradienter vid starter och stopp. En annan orsak till

termisk utmattning gäller för konstruktioner där ventilen är belägna intill anordningar där ångans temperatur reduceras eller regleras med kylvatten.

#### 2.2.4.2 *Provning av ventiler*

De provningsförfaranden som beskrivs för formstycken i **avsnitt 2.2.3.2** gäller även för ventiler. För gjutna ventiler bör eventuell förekomst av termiska utmattningssprickor uppmärksammas speciellt. Med ledning av ritningar av ventilen identifieras ändringar i godstjocklek och komplexa geometrier som kan bedömas föranleda skador. I många fall är utformningen sådan att skador kan initieras från insidan.

MT rekommenderas för områden där termiska transienter kan uppstå. Ett rekommenderat alternativ är 100 % provning, dels för att säkerställa att alla kritiska områden finns med vid provningen och dels för att indikera eventuella tillverkningsdefekter. För områden med risk för sprickbildning från insidan rekommenderas UT. Ett alternativ är MT från insidan genom att ta ut ventilens innanmäte. I så fall bör alla åtkomliga ytor provas. Gjutna komponenter är förknippade med porbildning och andra gjutfel samt större inneslutningar vilket kan göra att resultat från UT för att identifiera utmattningssprickor blir svårare. Referensprovning utanför kritiska områden kan utföras i syfte att särskilja olika indikationer. Speciella metoder och sökare finns framtagna som förbättrar provningen på gjutstål.

Vid replikprovning av gjutna ventilhus kan det vara värt att nämna att den typiska mikrostrukturen är annorlunda än för valsade och smidda komponenter i motsvarande material. En effekt av detta är att svetsar kan vara svårare att prova.

Ventilens mekaniska funktion bör kontrolleras med egenkontroll och fortlöpande tillsyn utöver de besiktningspliktiga intervallen. Program fastställs som tar hänsyn till ålder och användning. I samband med att en analys av den återstående livslängden av en ångledning utförs kan det vara lämpligt att undersöka eventuell förslitning av ventilens mekaniska komponenter.

#### 2.2.4.3 *Återstående livslängd hos ventiler*

En bedömning av den återstående livslängden av ventilhus följer samma principer som för formstycken vad gäller krypskador, se **avsnitt 2.2.3.3**. Uppträder termiska utmattningssprickor kan de avlägsnas och en svetsreparation kan utföras. Det är inte självklart att komponenten är återställd efter ett sådant förfarande. Typiskt uppstår nya utmattningssprickor i samma område eller i andra områden efter ett betydligt mindre antal cykler än för de tidigare sprickorna. En hög kvalitet på svetsreparationen där det säkerställts att alla sprickor är avlägsnade och att svetsegenspänningar avspänningsglödgas är avgörande för en längre återstående livslängd.

Ett allmänt förfarande för att göra beräkningar på den återstående livslängden är att anta att antalet cykler till sprickinitiering för komponenten är förbrukad och beräkna sprickpropageringen med brottmekaniska metoder. Beräkningarna kan då utföras med utgångspunkt av de detekteringsgränser som den oförstörande provningen av reparationen har utförts med. Den återstående livslängden för hållfasthet relateras sedan till de sprickstorlekar som kan accepteras. Så länge inga sprickor indikeras vid en återkommande inspektioner kan denna återstående livslängd gälla från tiden noll igen.

Skulle nya sprickor hittas får en ny analys utföras. Med stöd av nya beräkningar baserade på de nya sprickstorlekarna, undersökning av ventilens tillstånd med hänsyn

till krypskador och ångledningens tillstånd i övrigt kan beslut fattas om den lämpligaste åtgärden är komponentbyte eller ny reparation.

Brottmekaniska metoder som kan hantera termisk utmattnings och ta hänsyn till eventuell inverkan av krypning finns utvecklade men har inte etablerad tillämpning för alla situationer. Relevanta materialkonstanter finns inte alltid framtagna. En brottmekanisk analys fordrar därför djupgående insikter i de antaganden som görs för att kunna avgöra värdet av analysen. **Kapitel 1.8** beskriver sådana analyser närmare och i **Kapitel 1.7** om förstörande provningsmetoder och särskilt **avsnitt 1.7.6** i det kapitlet beskrivs provning för att ta fram materialdata som används i beräkningsmodeller.

Replikprovning kan användas i syfte att identifiera eventuella termiska utmattningskador på mikronivå så att en förfinad analys kan göras. Några allmänna förfaranden för analyser liknande de för krypskador finns inte etablerade men replikprovning kan rekommenderas i utvecklingssyfte.

#### 2.2.5 Rörböjar

Rörböjar införs, dels för att ångledningens in- och utlopp skall kunna anslutas, och dels för att ta upp krafter så att en spänningsutjämning i systemet kan uppnås. En viktig funktion är att öka systemets flexibilitet för att klara den termiska expansionen. Rörböjar utsätts därför för belastningar utöver inre övertryck, temperatur och egenvikt. Sådana belastningar ger vanligen ett öppnande eller stängande moment på böjen. Böjande deformation medför en ovalisering av tvärsnittet och en förändrad spänningsfördelning. Stora spänningar kan därför även uppstå längs böjens neutrallinjer. Systemspänningar på grund av felaktig upphängning verkar dessutom ofta på rörböjar.

Rörböjar i tjockväggigt gods är vanligtvis varmbockade. Bockningen kan medföra att böjen ovaliseras vilket redan från början ger spänningskoncentrationer som underlättar fortsatt ovalitetsbildning i drift. Högsta tillåten ovalitet enligt gällande norm, SS-EN 13480-4, är 4 - 10 % beroende på kvoten mellan medelbockningsradie och rörets ytterdiameter.

Varmbockningen medför ofta även att godstjockleken blir mindre vid ytterradien (ryggen) och större vid innerradien (buken) av böjen. Mikrostrukturen blir typiskt mer variationsrik än den normaliserade mikrostruktur som blir slutresultat vid tillverkning av varmvalsade raka rör. Då böjar är stora och otympliga och inte alltid har värmebehandlats i helt ändamålsenliga ugnar kan mikrostrukturen rentav vara felaktig med reducerad kryphållfasthet som följd.

##### 2.2.5.1 Skador i rörböjar

Rörböjar utsätts i första hand för krypning. Andra skademekanismer har sällan eller aldrig betydelse för livslängden av tjockväggiga rörböjar i ångledningar. Åldringsförsprödning kan dock tänkas förkorta livslängden i samband med krypning. Detta kallas då krypförsprödning som kan få signifikant inverkan efter längre drifttider, se vidare i **avsnitt 1.5.6**.

Skadefördelningar har kartlagts i undersökningar av rörböjar som bytts ut. Krypskadorna är ofta koncentrerade till böjens ytterradie men är inte sällan störst vid andra positioner. Även lokala variationer längs böjen är vanliga. Skadefördelningen beror på hur inre övertryck, systemspänningar, ovalitet, godsförtunning samt felaktiga

eller varierande mikrostrukturer, som beskrevs i avsnittet ovan, har bidragit till skadeutvecklingen. En förhöjd skadeutveckling längs yterradien kan till exempel förklaras av en tunnare godstjocklek i detta område på grund av bockningen. Skadorna i godstjockleksriktningen är i undersökta böjar högst vid ytterytan. Spänningsanalyser på inverkan av ovalitet kan dock visa spänningskoncentrationer vid innerytan. Skador som växer till inifrån har i enstaka fall påträffats längs böjens neutrallinjer.

#### 2.2.5.2 *Provning av rörböjar*

Tillståndsundersökning av en rörböj går dels ut på att finna eventuella krypskador och dels på att fastställa eventuell ovalitet och godsförtunning. Ovalitet, som kan öka med tiden, kan mätas med stora skjutmått med hög precision. Godsförtunning mäts med ultraljud. Mätpositioner finns angivna till exempel i de tyska riktlinjerna VGB-R 508L.

För att säkert kunna avslöja eventuella sprickor på ytterytan fordras 100 % MT. Det är av högst väsentlig betydelse eftersom krypsprickor i rörböjar kan propagera relativt snabbt. Haveri av rörböjar är förknippat snabb uppläkning eller explosion med förödande konsekvenser. Efter MT rekommenderas replikprovning för att kartlägga eventuell kavitetbildning.

Erfarenheten av hur krypskadorna kan fördela sig har resulterat i att rekommendationer utarbetats som anger positioner för en replikprovning (Storesund 2000). Böjen provas på ytter- och innerradie samt på sidorna (neutrallinjer) vid 5 ställen (snitt) längs böjen samt på råröret intill böjens ändar. Vid böjens mitt tas prover även mellan yterradie och neutrallinje. Resultat av ovalitets- och godstjockleksmätningar samt även andra omständigheter kan föranleda att provning av ytterligare positioner kan rekommenderas. Denna omfattning av provningen är nödvändig för att inte riskera att eventuella krypskador förblir oupptäckta och för att de största skadorna ska kunna hittas. En sådan provning kartlägger även böjens mikrostruktur. Eventuella felaktigheter i värmebehandlingen kan avslöjas. Degenererade mikrostrukturer kan observeras som kan ha orsakats av lång drifttid eller övertemperaturer. För bedömning av mikrostrukturer rekommenderas det att komplettera provningen med hårdhetsmätning.

Om en analys av resultaten från ovalitet och godstjockleksmätningar indikerar spänningskoncentrationer på insidan av godset rekommenderas UT vid dessa positioner.

Finns svetsar belägna nära en böj bör de replikprovas med hög prioritet eftersom de kan omfattas av spänningskoncentrationer som är förknippade med rörböjar.

Dokumentation av provningen måste vara så precis att återkommande undersökningar kan utföras vid samma positioner. Krav på erforderlig provpreparering beskrivs närmare i kapitel 1.6 om oförstörande provning och i Värmeforskrappport 706. Det är alltid lämpligt att tänka igenom allt man önskar uppnå med provningen innan denna påbörjas för att minska riskerna till ett bristfälligt utförande.

#### 2.2.5.3 *Återstående livslängd hos rörböjar*

Skadefria och måttriktiga rörböjar kan förväntas ha en lång återstående livslängd, åtminstone i paritet med den ursprungliga designlivslängden. En relativt lång återstående livslängd i förhållande till drifttiden då undersökningen gjordes kan förväntas också om de lägsta krypskadeklasserna observeras. För högre krypskadeklasser kan dock kortare tidsintervall till återkommande undersökningar



rekommenderas än för svetsar eftersom säkerhetsriskerna är större. Speciella rekommendationer för tidsintervall till uppföljande provning för rörböjar som omfattar de vanligaste materialen för sådana finns framtagna inom Nordtest (Nordtest TR 302, Auerkari 1997). Material 14MoV6 4 är trots sin relativt höga kryphållfasthet känsligt för krypning och allvarliga skador har i en del fall uppstått redan innan halva designlivslängden.

Uppmätta signifikant godsfortunning eller ovalitet bör en spänningsanalys genomföras. Om ovaliten är större än den ursprungliga är den återstående livslängden mer begränsad och krypskador kan förväntas tillväxa snabbare.

Hittas krypsprickor i rörböjar bör fortsatt drift undvikas av säkerhetsskäl. Reparationssvetsning är av samma skäl inte att rekommendera. Ett byte av rörböjen är generellt den enda acceptabla åtgärden. Det är därför väsentligt att ha god övervakning av böjar för att undvika oplanerade driftstopp. Vid betydande bildning av mikrosprickor eller om mycket omfattande kavitetsbildning föreligger kan det rekommenderas att planera ett byte av böjen till nästa revision.

#### 2.2.6 Svetsar

Komponenter i en ångledning är sammanfogade med svetsar och i många fall även uppbyggda av delar som är svetsade till varandra. Den termiska cykeln vid svetsning inverkar på materialens mikrostruktur så att många av de ursprungliga egenskaperna försämras. Flera olika försämringar kan inträffa som medför en reducerad hållfasthet och livslängd. Faktorer som inverkar på vilka och på hur stora försämringar som inträffar är till exempel grundmaterialens och svetstillätsmaterialens kemiska sammansättning, svetsmetod, svetsprocedur och värmebehandling.

Stora ansträngningar görs för varje typ av svets för att eliminera eller minimera de försämrade egenskaperna men de kan inte undvikas i alla avseenden. Konstruktionsmässiga lösningar kan också tillgripas för att ge en svetsad komponent en fullgod hållfasthet men förståelsen för beteendet av svetsar som är påkända vid höga temperaturer har i många avseenden inte varit tillräcklig för att kunna optimera konstruktionen. Omfattande forskning på detta område har dock inneburit en väsentligt förbättrad förståelse under senare år.

Komponenter i ångledningar svetsas nästan uteslutande med manuell metallbågsvetsning (MMB) efter att rotsträngen svetsats med TIG. MIG och pulverbågsvetsning kan ha användning på vissa komponenter och tillämpas i större utsträckning utomlands, ofta då maskinellt för att kunna öka effektiviteten och styra svetsningen mer kontrollerat.

Materialegenskaperna i svetsar är förknippade med en avsevärd spridning. Utveckling av svetsmetoder och svetsprocedurer har gjort att denna spridning har kunnat minskas. Fortfarande finns det dock nyvunna insikter som skulle kunna minska spridningen ytterligare men som inte alltid tillämpas i praktiken. Detta gäller till exempel vikten av att grundmaterialets och svetstillätsmaterialets egenskaper matchar varandra och att tillämpa svetsmetodik för att minimera grovkorniga mikrostrukturer.

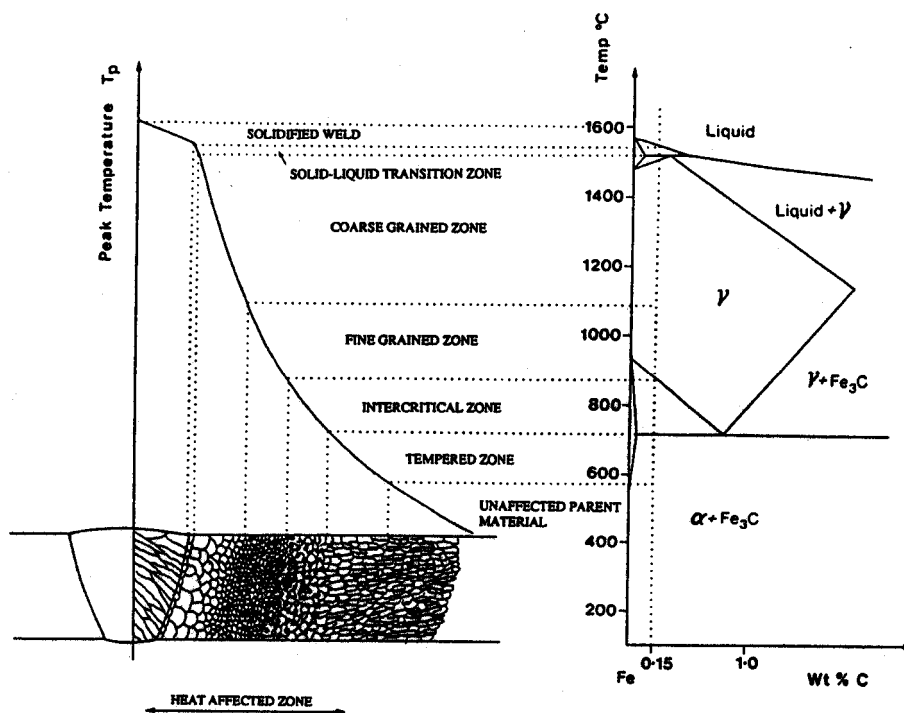
Svetsar kan vid krypbelastning betraktas som metallurgiska notchar eftersom fleraxliga spänningstillstånd och spänningskoncentrationer uppstår, särskilt vid svetsens värmepåverkade zoner. Komponentens geometri inverkar i hög grad på denna



spänningsfördelning som dessutom är föränderlig med tiden. Sådana faktorer kan ha stor betydelse för svetsens livslängd.

#### 2.2.6.1 Skador i svetsar

Livslängden av komponenter i ångledningar begränsas i många fall av svetsarnas kryplivslängd. Figur 2.2-7 visar en svets i tvärsnitt där den typiska mikrostruktur som uppstår i svetsgodset och värmepåverkad zon (HAZ) illustreras. De olika mikrostrukturerna är relaterade till den temperatur som uppnås vid svetsningen. Ett ökande avstånd från svetsen medför en minskande pikttemperatur. De olika mikrostrukturerna representerar olika krypegenskaper i fråga om krypbrottgräns, kryptöjningshastighet och krypduktilitet (krypbrottförlängning). Till exempel har den grovkorniga delen av HAZ närmast smältgränsen generellt en högre krypbrottgräns men lägre krypduktilitet än grundmaterialet. För den finkorniga delen av HAZ som är belägen längre bort från svetsgodset gäller det omvända förhållandet: en lägre krypbrottgräns och en högre krypduktilitet än grundmaterialet. Sammantaget är dock egenskaperna i svetsen försämrade. Det laminat av olika mikrostrukturer som figuren visar medför vidare spänningstillstånd som både kan förvärra och kompensera för den reducerade hållfastheten som enskilda delar av svetsen kan uppvisa.



Figur 2.2-7 Schematiskt diagram av de olika mikrostrukturerna tvärs en svets som resultat av en svetstermisk cykel i ett låglegerat stål.

Figure 2.2-7 A schematic diagram of the various microstructures across a weld as a result of the welding thermal cycle in a low alloy steel.

Med denna bakgrund kan det förstås att det krävs en hel del detaljkännedom för att kunna förutsäga skador och särskilt krypskador i svetsar. Typiska skador har för ganska länge sedan klassificerats som Typ I, II, III och IV-sprickor, varav Typ III och

IV-sprickor ofta omtalas. Typ I och II-sprickor förekommer främst i svetsgodset och uppstår vid stelning eller avspänningsglödning av svetsen. Sådana sprickor är inte längre så vanligt förekommande i driftsatt utrustning då de kan undvikas med modern svetsmetodik och lätt upptäckas med moderna OFP-metoder vid tillverkningskontrollen.

Typ III-sprickor uppträder i den grovkorniga delen av HAZ närmast smältgränsen och är, åtminstone när det gäller makrosprickor, orienterade i omkretsled för rundsvetsar. Även sådana sprickor kan uppstå vid avspänningsglödning på grund av att svetsegenspänningar relaxerar genom krypning. Sådana kryprelaxationer kan fortsätta, eller om svetsen inte är avspänningsglödgd, påbörjas då svetsen tas i drift. Sprickor kan då uppstå efter kortare drifttider. När typ III-sprickor bildas på grund av kryprelaxationer av svetsegenspänningar betecknas de återvärmningssprickor. Återvärmningssprickor har även observerats i svetsgods (sprickorna faller då inte in inom klassen typ III som definierats vara belägna i grovkornig HAZ). Även kavitetsbildning kan uppstå i grovkorniga mikrostrukturer i HAZ och svetsgods på grund av kryprelaxation av svetsegenspänningar.

Typ III-sprickor kan även uppstå efter längre drifttider och då vara orsakade av kryppåkänningarna i drift. Det är inte ovanligt att mikrosprickor uppstår i form av återvärmningssprickor som förblir oupptäckta och heller inte propagerar under långa tider. När tillräckligt lång kryplivslängd är förbrukad initierar de dock fortsatt sprickpropagering.

Typ IV-sprickor finns i gränsområdet mellan grundmaterial och finkornig HAZ, så kallad interkritisk HAZ, och är orienterade i omkretsled för rundsvetsar. De är oftast förknippade med axiella spänningsförhöjningar och är typiskt orsakade av systemspänningar eller komponentgeometrier som ger en förhöjd axiell spänningskomponent. Efter mycket långa drifttider finns det fall där de uppstått utan att sådana axiella påkänningar kan anses ha bidragit.

I princip följer krypskador i svetsar ett likadant mönster av kavitetsbildning som utvecklas till sprickor så som det beskrivs i **avsnitt 1.5.2**. Hur mycket kaviteter som bildas innan sprickorna uppstår beror på material, mikrostruktur, spänning och temperatur.

Blandsvetsar där svetstillsatsmaterial och grundmaterialet är av olika typer är mer känsliga för krypskador än artlika svetsar. Avspänningsglödning som inte kan vara optimal för båda materialen, stora skillnader i krypegenskaper mellan grundmaterial och svetstillsatsmaterial samt effekter av avkolning och uppkolning vid svetsarnas smältgränser är exempel på orsaker till detta.

Blandsvetsar kan även vara känsliga för skillnader i termisk utvidgning. De termiska spänningar som uppstår relaxerar genom krypning medförande att en lokal kryptöjning ackumuleras i takt med antalet kallstarter. Skadorna är ofta lokaliserade till HAZ eller intilliggande svetsgods. Austenitiska stål svetsade till ferritiska stål medför relativt stor skillnad i termisk utvidgning och risk för sprickor redan efter ett relativt litet antal starter och stopp. Ändring av driften från fåtaliga till frekventa starter och stopp kan därför bli förödande för sådana svetsar.

Svetsar är ofta mer känsliga för driftinducerad försprödning än grundmaterial. Dessutom kan avspänningsglödningen ge stora försprödningseffekter. Eftersom svetsar inte sällan har en låg seghet redan från början kan en tilltagande försprödning

bli kritisk, till exempel vid provtryckningar. Olika försprödningsfenomen finns beskrivna i **avsnitt 1.5.6**.

#### 2.2.6.2 *Provning av svetsar*

Oförstörande provning utförs till stor del på svetsar och olika provningsmetoder har sina möjligheter och begränsningar. Nya metoder och tillämpningar utvecklas men det är få utöver de traditionella som har fått genomslagskraft. Detta beskrivs i **kapitel 1.6**. I ångledningar och generellt också i andra system provas svetsar dels för att finna tillverkningsdefekter och dels för att finna driftinducerade skador. Metoder som används till att kontrollera tillverkningsdefekter används även i många fall till att detektera sprickor som uppstått i drift. Andra skador som relaterar till åldring av materialet kräver andra metoder. Svetsar kan innebära ~~ofta~~ att tolkningen av provningen försvåras. Vanligen utprovas en ny metod på grundmaterial och sedan på svetsar för att förutsättningarna för förståelsen för provningen ska vara så goda som möjligt. Det rekommenderas därför att alltid vara uppmärksam på hur pass väletablerad en färsk metod är vid tillämpning på svetsar.

Bland de väletablerade OFP-metoderna är MT, UT, replikprovning och hårdhetsprovning de i särklass mest använda vid tillståndsundersökningar av svetsar i ångledningar. Utöver vad som beskrivits tidigare i **kapitlen 1.6** och **2.2** kan det här nämnas vikten av att svetsen provas på ett representativt sätt. För MT och UT rekommenderas 100 % runt om en rörsvets. Används båda metoderna kan både ytliga och inre fel indikeras.

Replikprovning bör utföras vid minst 4 positioner runt om med 90° delning. Positionerna orienteras så att möjliga riktningar för inverkan av systemspänningar omfattas. Tvärs svetsen provas grundmaterial, HAZ och svetsgods med ett erforderligt antal prover så att grundmaterial på en bits avstånd från svetsen, hela HAZ på båda sidor av svetsen med intilliggande grundmaterial och svetsgods samt svetsgods i svetsens centrum inkluderas. Procedurer och rekommendationer för replikprovning av svetsar ges i Värmeforskrapporterna 627 och 706, (Wu 1997) respektive (Storesund 2000).

Erfarenheterna av mikrohårdhetsprovning i fält visar att tillförlitliga resultat fordrar metallografiskt preparerade ytor motsvarande sådana som krävs för replikprovning. Detta rekommenderas starkt vid provning av svetsar där stora lokala hårdhetsvariationer kan uppträda, särskilt i HAZ. För att kunna registrera sådana variationer krävs stor precision på provpositionerna och liten spridning av provresultaten. Mikrohårdhetsprovning i fält kan också vara mycket känslig för geometri och storlek av provobjektet. Utförliga utvärderingar av olika apparater för mikrohårdhetsprovning i fält har utförts i ett Nordtest-projekt (Borggreen 1999).

#### 2.2.6.3 *Återstående livslängd hos svetsar*

Återstående livslängd av svetsar kan bedömas efter likadana principer som beskrivs om formstycken (**avsnitt 2.2.3**) så länge det rör sig om rundsvetsar. Haverier på grund av runtgående sprickor i sådana svetsar börjar vanligen med en läcka vilket medför mindre säkerhetsrisker än för raksvetsar och rörböjar. Axiella sprickor kan, om de uppstår i svetsgods, förväntas att bromsas då de propagerar in i grundmaterial.

Påträffas inre defekter vid en tillståndsundersökning kan det vara svårt att avgöra om det rör sig om en tillverkningsdefekt om svetsen inte tidigare provats på samma sätt med samma resultat. Även om mycket tyder på att det rör sig om en

tillverkningsdefekt är det svårt att avgöra om tillväxt har skett. Alla defekter bör därför vid minsta tveksamhet betraktas som om de uppstått i drift. Mekanismer för inre skador kan inte bestämmas annat än att defekten skärs ut för en metallografisk undersökning. Detta medför att svetsen måste repareras och ingreppet kan leda till omfattande åtgärder. Kan defekten storleksbestämmas rekommenderas följande strategi:

Defekten antas kunna ha uppkommit i drift och analyseras konservativt med brottmekaniska metoder för de mekanismer som är tänkbara och med särskild hänsyn till erfarenheter, egenskaper och annan provning på den aktuella svetsen. Om resultaten kan visa att det inte föreligger risk för att defekten blir kritisk kan fortsatt drift under en lämplig tid tillåtas för att åter undersöka defekten med avseende på eventuell tillväxt.

För bedömning av krypskador finns rekommendationer som specificerar svetsar för kraftverksstål 14MoV6 3, 13CrMo4 4, 10CrMo9 10 och X20CrMoV12 (Auerkari 1997). Rekommendationerna är baserade på analyser av krypskadeutveckling från omfattande databanker på replikprovning.

I tidigare rekommendationer bedöms alla komponenter på samma sätt. I Nordtest NDT010 specificeras de material rekommendationerna gäller för men det är inte ovanligt att de tillämpas även på andra. De tillämpas även på samma sätt för olika typer av svetssystem, även sådana som inte eller i begränsad utsträckning ingår i det underlag rekommendationerna baserar sig på. Värmeforskrappport 1170 (Vilhelmsen 2011) redogör för studier och erfarenheter av 9 och 12 % Cr-stål som pekar på att krypskadeutvecklingen hos dessa inte skiljer väsentligt från låglegerade stål och att de kan utvärderas efter samma riktlinjer och skadeskalor.

Den återstående kryplivslängden hos en svets är i regel kortare än hos de grundmaterial som svetsats ihop. Svetsens återstående livslängd kan oavsett detta vara tillräckligt eller otillräckligt lång i förhållande till en eventuell målsatt livslängd av ångledningssystemet och anläggningen i stort. Svetsen kan dock vara känsligare för faktorer som minskar den återstående livslängden än grundmaterialet. Exempel på sådana faktorer är:

- Spänningskoncentrationer
- Termisk cykling
- Försprödning

Det kan vara svårt att bestämma effekterna av sådana faktorer med någon större precision men det är till exempel i vissa fall möjligt att beräkna spänningskoncentrationer i svetsen med hänsyn till svetsens egenskaper, komponentens geometri och systemspänningar. Osäkerhetsfaktorer vid sådana beräkningar kan vara att de materialdata som används för svetsen inte är helt relevanta och att den använda beräkningsmodellen inte är verifierad för den aktuella komponentgeometrin.

Med resultat av återkommande replikprovning kan den förväntade skadeutvecklingen bekräftas eller omvärderas. Krypskadeutvecklingen i anläggningar visar sig ibland ske mer ryckvis än vad som brukar observeras i laboratorieexperiment. En effekt av detta är att de positioner som hade de högsta skadeklasserna i en undersökning kan ha blivit förbigångna av andra positioner som får de högsta skadeklasserna vid en följande

undersökning. Det är därför väsentligt att uppföljande undersökningar har en tillräckligt stor omfattning.

Återkommande replikprovning och beräkningar i komplement till varandra ger goda förutsättningar till att följa upp och precisera prognoser av den återstående livslängden. Förstörande provning ökar förutsättningarna för att kunna precisera beräkningar och analyser. Mekanisk provning av svetsar är i sig av komplex natur, inte minst kryp, krypsprickpropagerings- och utmattningsprovning. Analyser av resultaten är också komplexa och så kallad cross-weld provning har många gånger utförts på ett bristfälligt sätt och även tolkats så att de återstående livslängdsbedömningarna blivit missvisande.

Oavsett nivå men särskilt för högre nivåer av undersökningar och analyser som tillämpas för att bedöma och prediktera den återstående livslängden rekommenderas det att genomföra en noggrann känslighetsanalys, se **kapitel 1.8**, för att säkerställa att bedömningarna är riktiga.

#### REFERENSER

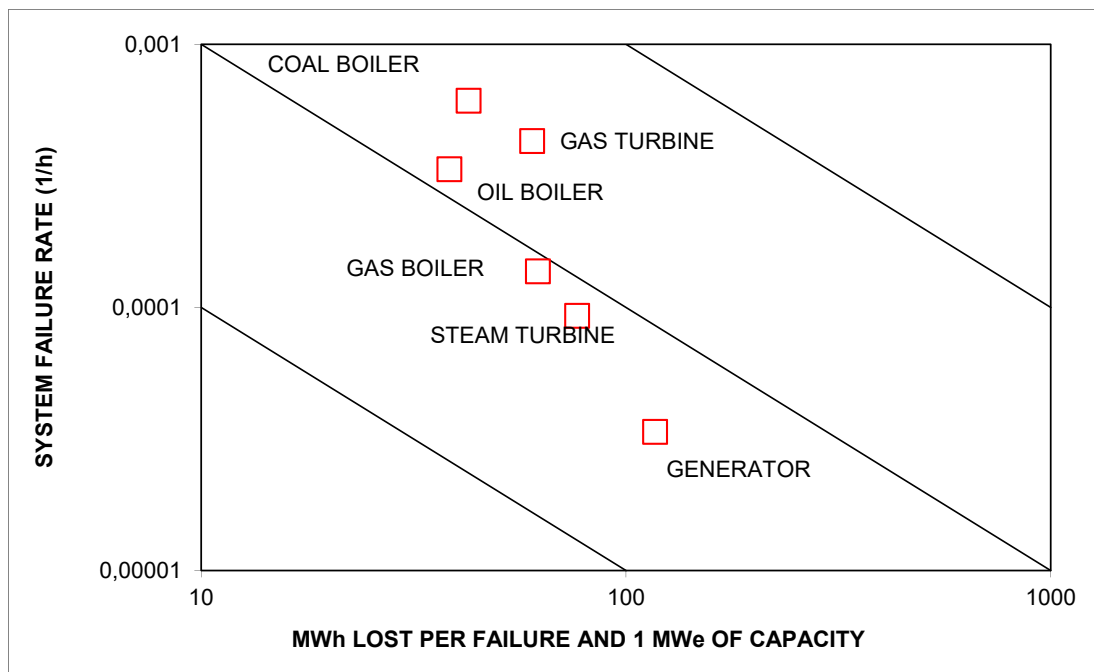
- ANSI/ASME B31.1. 1980. Power Piping, 1980 Edition.
- Auerkari P. et. al. 1997. Nordtest project 1306-96: VTT report VALB 211.
- Borggreen K. et. al. 1999. Comparison of Portable Hardness Testers. Nordtest Technical Report 424, Part 1-3.
- Hardke von H. & Becker U. 1991. Einbau und Inbetriebnahme von Feder- und Konstanthängern - praktische Erfahrungen, VGB Kraftwerkstechnik 71 (1991), Heft 2, pp.128-133.
- NT NDT 010. 1991. High temperature components in power plant: Remnant lifetime assessment, Replica inspection; Nordtest Method, NT NDT 010.
- Parker J. D. 1998a. Recent advances in condition assessment based on strain monitoring, Baltica IV, VTT Symposium 185, Espoo (1998), pp. 239-250.
- Parker J. D., Stratford G. C., Shaw N., Spink G. & Metcalfe H. 1998b. The application of miniature disc testing i CrMoV rotor steel, Baltica IV, VTT Symposium 185, Espoo (1998), pp. 477-488.
- Roos E., Kessler A., Eckel M. & Ausfelder U. 1996. Lebensdauerüberwachung von Kraftwerksbauteilen unter Berücksichtigung von Zusatzbelastungen, VGB Kraftwerkstechnik 76 (1996) Heft 5.
- Rörledningsnormer 1978, RN78, Tryckkärlskommissionen.
- Segle P., Algotsson P. & Samuelsson Å. 1999. Inverkan av ingrepp i ångledningssystem på dess återstående kryplivslängd. Värmeforskrapport 672.
- Stevick G. R. & Finnie I. 1991. Failure assessment of weldments at elevated temperatures, Proc. 6<sup>th</sup> Int. Conf. Mechanical Behaviours, Tokyo.
- Storesund J. 1996. Oförstörande provning för livslängdsbedömning av högttemperaturanläggningar, Värmeforskrapport 587.

- Storesund J. 1999. Reparationssvetsning av kryppåkända komponenter i högtemperaturanläggningar med rekommendationer, Värmeforskrapport 657.
- Storesund J. 2000. Rekommendationer för replikprovning av högtemperaturkomponenter i kraftanläggningar, Värmeforskrapport 706.
- Tettamani S. & Crudeli R. 1998. Small punch creep test: A promising methodology for high temperature plant components life evaluation, Baltica IV, VTT Symposium 185, Espoo (1998), pp. 501-510.
- TRD 508.1978. Vulkan-Verlag, Essen.
- TRD 201. Vulkan-Verlag, Essen.
- Tryckkärlsnormer 1987, TKN87, Tryckkärlskommissionen.
- Ware A. G. 1982. Moment loads induced by pressure and momentum forces in piping, Trans. Of the ASME, Vol. 104, November 1982, pp. 268-271.
- VGB-R 508 L. 1996. VGB Fachausschluss "Rohrletungsanlagen, armaturen" R-508 L.
- VGB R-510 L
- VGB R-509 L. 1984.
- Wortel van J. C., Heerings J. H. & Arav F. 1995. Integrity of creep damaged components in power plant generation plants after repair welding without post weld heat treatment, Baltica III, VTT Symposium 150, Espoo (1995), pp. 255-270.
- Wu R., Storesund J. & Sandström R. 1997. Framtagning av repliker för utvärdering av mikrostrukturen i högtemperaturkomponenter, nödvändiga kvalifikationer för operatörer, Värmeforskrapport 627.

## 2.3 ÅNGTURBINER

### 2.3.1 Allmänna egenskaper

Utvecklingen av processer, flöden och strukturell design samt material och tillverkningsteknologi har gjort ångturbinen till en av de huvudsakliga komponenterna inom kraftkonversion och att den även har behållt denna roll. Den första kommersiella Parsons-ångturbinen på 7,5 kW från 1884 presterade en cyklisk verkningsgrad på nästan 10 % med mättad ånga vid 186 °C. Med den nyaste teknologin uppnås i dag verkningsgrader på mer än 45 %, kapaciteter på 1000 MWe för en turbinenhet och ångtemperaturer över 600 °C. Investeringskostnaden för en ångturbin som kraftverkskomponent är betydande (per MWe) och det är vanligtvis viktigt för hela kraftverket att turbinerna drivs utan att man gör avkall på deras driftsäkerhet. Ångturbiner har konstruerats för långvarig drift med beaktande av omfattande säkerhetsfaktorer och de är vanligtvis mycket tillförlitliga och hållbara i jämförelse med många andra komponenter inom kraftproduktionen (t.ex. pannor och gasturbiner), se Figur 2.3.1-1a. Haverier som är helt förödande har dock, om än mycket sällan, inträffat (Figur 2.3.1-1b).



**Figur 2.3.1-1a)** relativ prestationsförmåga hos huvudkomponenterna i ett kraftverk, av vilken ångturbinens goda tillförlitlighet jämfört med pannor och gasturbiner framgår (källa: NERC-data). De sjunkande linjerna pekar på en konstant risk för oväntade driftstopp vid kraftverket.

**Figure 2.3.1-1a)** relative performance of the main components of power plant, showing the good reliability of steam turbines in comparison with boilers and gas turbines (from NERC data). Inclined lines correspond to constant risk of unexpected plant shutdown.





**Figur 2.3.1-1b) Ångturbiner: haveri av en enblockshögtrycksrotor till följd av utmattningsbrott som uppkommit på grund av ett tillverkningsfel i centrum av rotorn.**

**Figure 2.3.1-1b) Steam turbines: failure of a monobloc HP rotor due to fatigue and fracture initiated from a manufacturing defect at the rotor centre;**

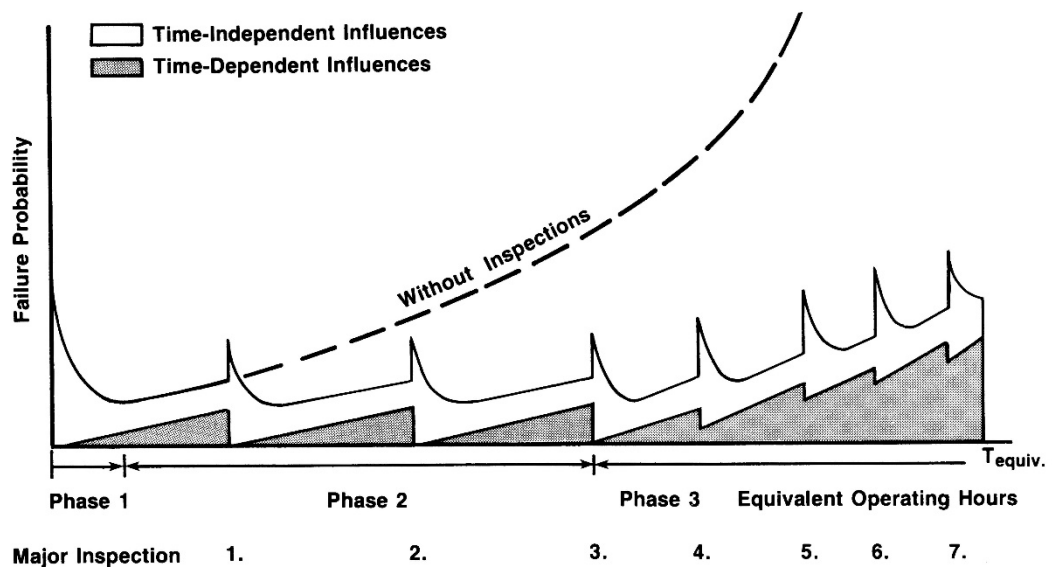
Många äldre ångturbiner från 1950- till 1970-talet är fortfarande i drift, och dessa maskiner grundar sig ofta på ännu äldre konstruktionsprinciper, materialval och tillverkningsteknologi. Det är vanligt att utnyttja de tekniska och ekonomiska möjligheterna att förlänga livslängden hos en ångturbin, dvs. att driva ångturbinen längre än den ursprungliga, nominella konstruktionslivslängden (vanligtvis 100 000–250 000 h). Detta underlättas även delvis av de relativt rimliga underhållskostnaderna, vilket är en följd av turbinens tillförlitlighet och att den i motsats till pannor och gasturbiner inte innehåller några förbränningsytor. Att förlänga livslängden kräver dock gott tekniskt omdöme, eftersom haverier kan bli mycket dyra. Utvecklingen av turbinkonstruktionen kan innebära att man kan tillåta reduktioner av säkerhetsfaktorerna. Detta kan leda till sämre möjligheter att förlänga livslängden för nyare maskiner så att den blir betydligt längre än konstruktionslivslängden. En ångturbinens livslängd kan å andra sidan ses som en förnödenhet, dvs. en angiven livslängd kan köpas till priset av en ny investering lika väl som i ett senare skede genom drift och underhåll.

I praktiken är de metoder och åtgärder som tillämpas inom livslängdsarbete och, när det är motiverat, förlängning av livslängden, integrerade till en del av turbinunderhållsprogrammet. Strategierna avseende livslängdsarbete för en ångturbin kan grunda sig på:

- maximivinst för en viss period i framtiden (hög tillgänglighet och låga underhållskostnader);

- minimikostnad för en viss period i framtiden (t.ex. i en ansträngd kassasituation);
- nödvändig driftsäkerhet för en viss period (t.ex. grundad på stora leveranskontrakt); eller
- en kombination av faktorerna ovan

Det är inte nödvändigtvis enkelt att i detalj optimera intäkterna mot kostnaderna för en ökande men okänd sannolikhet för brott som skulle kunna begränsa komponenternas livslängd. De komponenter vars livslängd är mest begränsade ger dock varningar före slutligt brott genom att i tid indikera nötning eller avtagande prestanda så att nödvändiga underhållsåtgärder kan vidtas. Av denna orsak är det av stor vikt att tydliga indikationer på avtagande prestanda eller återstående livslängd observeras och tolkas tillräckligt exakt. Det är viktigt också därför att underhåll till en början ökar sannolikheten för brott och störningar (Figur 2.3.1-2). När det gäller att optimera underhåll och livslängdshantering ger tidigare erfarenheter av ångturbiner och underhåll god vägledning. Nedan betraktas allmänna erfarenheter av livslängdsbedömning för ångturbiner och därmed förknippade viktiga aspekter.



**Figur 2.3.1-2.** Principerna för att hantera ångturbiners livslängd inom underhållet. Märk att de stora revisionsintervallen i själva verket också kan vara konstanta eller till och med ökande beroende på turbin, underhållsåtgärd och driftsätt. Att livslängden tar slut beror ofta i högre grad på ekonomiska aspekter än tekniska aspekter som hänför sig till brottsannolikhet.

**Figure 2.3-1-2.** The principles of managing steam turbine life time in maintenance. Note that in reality the major revision (inspection, maintenance) intervals can also be constant or even increasing depending on turbine, maintenance action and type of service. The end of life is frequently due to economical constraints rather than technical issues related to failure probability.

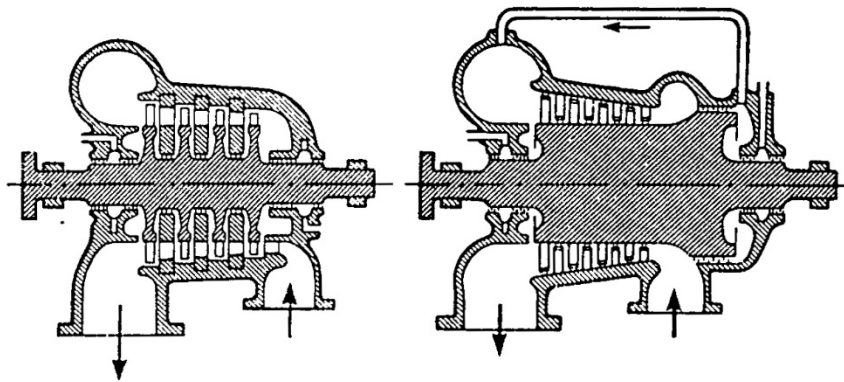
### Grundläggande ångturbin konstruktion

Beroende på betraktelseperspektivet kan ångturbiner klassificeras enligt funktionella principer, strukturella konstruktionsegenskaper eller kraftverkstyp. Nedan ges en kort beskrivning av de olika klassificeringssätten.

### Funktionell klassificering av ångturbiner

Ångturbiner kan enligt principerna i ångflödet delas in i två huvudgrupper. I *impulsturbiner* (*aktionsturbiner*) är ångentalpin konverterad till kinetisk ångenergi i den stationära ledskenssektionen. Ångflödets hastighet är nästan konstant genom sektionen av roterande skovlar, som roteras av den direkta impulsen av ångflödet. I *reaktionsturbiner* är ångentalpin konverterad till kinetisk ångenergi både i ledskens- och skovelsektionen. Den ökade ångflödes hastigheten ger också upphov till en reaktionskraft som roterar skovlarna och därigenom rotern.

Typiska utformningar av impuls- och reaktionsturbiner presenteras i Figur 2.3.1-3.



**Figur 2.3.1-3.** Typiska utformningar av impulsturbiner (t.v.) och reaktionsturbiner (t.h.). Observera de utstående skivorna i impulsturbinen och roterns stora diameter i reaktionsturbinen.

**Figure 2.3.1-3.** Typical structural features of impulse (left) and reaction (right) turbines. Note the prominent disks in the impulse turbine and the large diameter rotor of the reaction turbine.

Alla turbiner innefattar i själva verket både impuls- och reaktionsprinciper till en viss grad. En turbin kallas impulsturbin när impulsprincipen är dominerande i konstruktionen. De flesta moderna turbiner tillverkade i Europa är reaktionsturbiner, medan impulsturbinerna är vanligare i den "anglosaxiska världen". Vardera turbintypen existerar med andra ord i Europa. De kompakteste nya maskinerna (med enkel cylinder) konstruerade för kombikraftproduktion är impulsturbiner. Strukturellt sett är impulsturbinernas skovelsystem vanligen fäst vid skivor på en tunn mittaxel (åtminstone i mellantrycks- och lågtryckssektionerna), medan reaktionsturbinernas skovelsystem är fäst vid ett enkelt monoblock med relativt stor diameter eller en svetsad rotor.

### Klassificering enligt ångflödets riktning

En annan vanlig indelning av turbiner grundar sig på ångflödets riktning. I *radialturbiner* flödar ångan i första hand vertikalt i förhållande till axelns rotation. Radialturbiner har vanligtvis två skoveluppsättningar som är fästa vid två skivor som roterar i motsatt riktning. Mycket vanligare är dock *axialturbiner*, i synnerhet när det gäller turbiner som är större än 10 MWe, där ångan främst flödar i samma riktning som axeln roterar.

De flesta moderna turbiner är axialturbiner. Det finns även turbiner som har ett kombinerat radiellt och axiellt ångflöde. Radiella turbiner är vanligtvis relativt små reaktionsturbiner, medan axialturbiner kan vara impuls- eller reaktionsturbiner, eller en kombination av dessa.

#### Klassificering enligt kraftverkstyp

Ångturbiner kan även indelas enligt den typ av kraftverk som de används för, eftersom detta är en faktor som påverkar konstruktionen. En grov indelning kan göras i *kondensturbiner*, som endast används för elproduktion, och i *mottrycksturbiner*, som också producerar ånga för industriellt ändamål eller för uppvärmningsändamål (t.ex. fjärrvärme).

Dessa typer kan ytterligare indelas i undergrupper t.ex. beroende på om turbinen är utrustad med avtappningsutlopp eller inlopp för ånga vid olika tryck och temperaturer. Om turbiner ursprungligen är avsedda för baskraft (fortgående drift med endast ett fåtal uppstarter) konstrueras de annorlunda än turbiner som skall täcka kortfristiga topplaster. Den sistnämnda typen konstrueras i allmänhet med en snabbare tillåten uppstartningstid, vilket innebär en viss kompromiss med tanke på verkningsgraden vid full belastning.

#### *Faktorer relaterade till turbiners prestanda och livslängd*

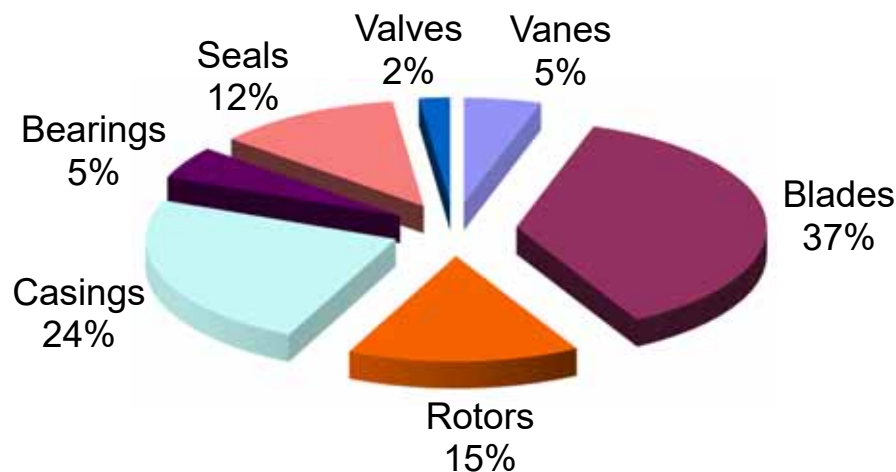
I ideala fall drivs turbinerna i driftförhållanden som ger en livslängd som är optimerad för den ekonomiska resultatprofilen. Då randvillkoren ändras under långvarig drift kan det avsedda driftsättet småningom även ändras. Det är inte möjligt att ta hänsyn till alla dessa förändringar i den ursprungliga konstruktionen, som också endast i stora drag förmår beakta de många andra faktorer som påverkar livslängden, t.ex. materialkvalitet, tillverkning eller montering samt faktiska driftförhållanden. Driftsättet är otvivelaktigt en av de faktorer som allra mest inverkar på turbinens driftkondition och livslängd.

Utöver detta kan modifiering och strukturella ändringar av turbinen även ske senare, om turbinen t.ex. konverteras från kondensdrift med baslast till en mångsidigare mottrycksdrift. Eftersom den ursprungliga konstruktionen av flödet inte är optimerad för det nya driftsättet kan det ge upphov till oväntade förändringar i belastningen. Ett exempel på förändring av nominell påkänning är om man kör en turbin med reglersteg långvarigt vid dellast, vilket innebär att ångdistributionen i inloppet är koncentrerat till ett enda segment. Detta medför en högre belastning av dyskammare, dyssegment och reglersteg vid dellast än vid full last, vilket kan leda till en oväntad skada.

Ett annat exempel beskriver verkningarna av driften. Om turbinen drivs i baslastsproduktion ca 7000–7500 timmar per år kan man räkna med ca 20 uppstarter per år. I förhållanden med en mera cyklisk drift med t.ex. 4000 timmar per år ökar antalet uppstartningar till 60 eller mer per år. I detta fall är belastningen inte längre statisk med krypning, nötning etc. som dominerande brottmekanismer. I stället kan cykliska brottmekanismer som termisk, mekanisk och korrosionsutmattningsdominera, vilket kan ge upphov till sprickor som förkortar livslängden. Ett ändrat driftkoncept kan innebära att relativt korta och ofta återkommande perioder av behov på marknaden tillgodoses med turbiner av äldre årgångar som ursprungligen konstruerades och byggdes för en konstant belastning, och som inte längre motsvarar den aktuella driftsituationen.

Eftersom ångturbiner traditionellt inte klassificeras som tryckbärande anordning tillämpas inte heller det regelverk som traditionellt utarbetats för tryckbärande anläggningar. I tekniskt avseende skiljer sig ångturbinernas heta inloppssektioner dock inte mycket från tjockväggiga högtemperaturkomponenter i pannor och ångledningar (med huvudventiler). Metoder av konstruktion och omvänd konstruktion (inverse design) för livslängdsbedömning som liknar de som utvecklats för standardmässig behandling av tryckbärande anläggningar vid höga temperaturer finns dock tillgängliga (t.ex. EN 12952, EN 13445 och EN 13480 samt tyska standarder för TRD 300-serier och TRD 508). Dessa metoder används med vissa modifieringar även i stor utsträckning av tillverkarna.

Det finns emellertid ett stort antal delar av ångturbinerna där parallella erfarenheter av andra huvudkomponenter i anläggningen inte är av stor hjälp. För att kunna hantera livslängden framgångsrikt är det när det gäller dessa delar viktigt att finna karaktärstiken och nyttja erfarenheter som är specifika för komponenten i fråga (Figur 2.3.1-4). Detta innebär ofta även att samla erfarenheter från andra turbiner som närmast motsvarar turbintypen i fråga.



**Figur 2.3.1-4.** Ställen för skador och haverier i ångturbiner klassificerade enligt totalkostnaden (källa: Allianz). Rotorerna inkluderar rotorskivor.

**Figure 2.3.1-4.** Location of steam turbine failures by total cost (source: Allianz). Rotors include disks.

Nedan betraktas specifika egenskaper hos huvudkomponenter i en turbin med avseende på livslängdshantering. Behandlingen indelas enligt de huvudkomponenter som antingen kan begränsa hela turbinens livslängd eller åtminstone leda till ett potentiellt driftstopp ifall av haveri. Eftersom driftstopp i en turbin även kan leda till att driften i större delar av en anläggning stoppas, är dessa komponenters kondition och livslängd av stor betydelse.

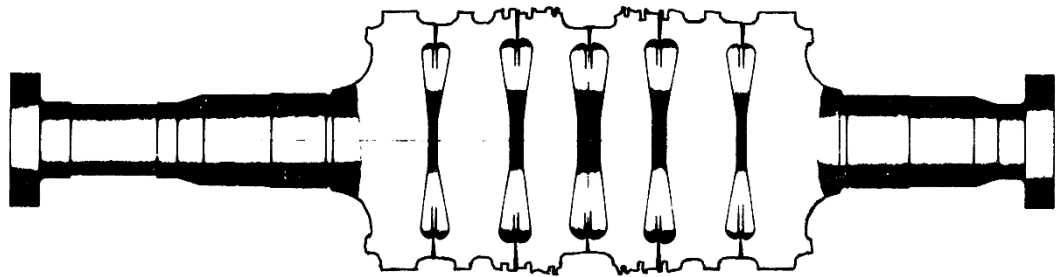


### 2.3.1.2 Rotorer och skivor

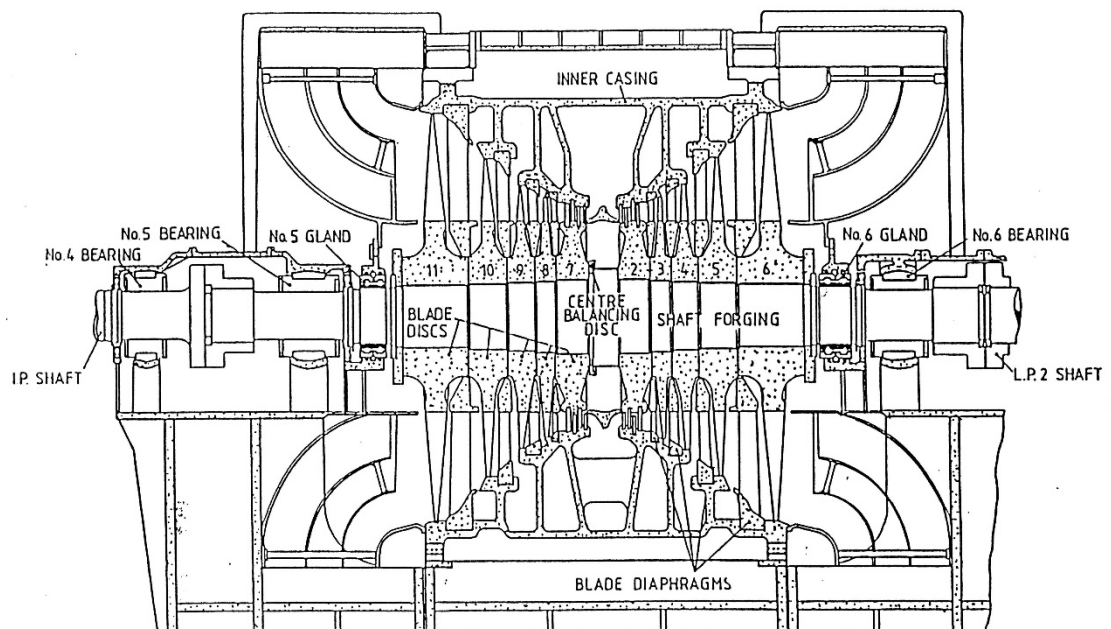
#### Allmänna egenskaper

Turbinrotorer är beroende på tillverkare och typ tillverkade som:

- a) gjutna, smidda eller pulvermetallurgiskt (PM) tillverkade enblocksrotorer;
- b) rotorers hopsvetsade av gjutna och smidda delar (Figur 2.3.1-5a); eller
- c) rotorers som består av en mittaxel med gjutna eller smidda skivor som krympmonterats på axeln (Figur 2.3.1-5b).



a)



b)

Figur 2.3.1-5. Rotortyper: a) svetsad rotor och b) rotor med skivor på en mittaxel.

Figure 2.3.1-5. Rotor types: a) welded rotor and b) rotor with disks on a central shaft.

De flesta mindre högtrycksrotorerna är av enblockstyp, medan större mellantrycks- och lågtrycksrotorer (MT och LT) kan vara av vilken huvudtyp som helst. Enblocksrotorer har gjorts både med och utan ett borrhål i centrum. Borrhålet var ursprungligen avsett för att avlägsna material och materialrester från centrum av den gjutna rotordelen eftersom defekter och segringar ofta blir omfattande i dessa områden vid tillverkningen. Borrhålet har senare dessutom ofta använts vid rotorinspektioner. Maximala driftspänningar har dock visat sig uppträda vid borrhålets yta, varför borrhålet kan vara kritiskt för initiering av livslängdsbegränsande skador.

Turbinsklor är antingen separata delar som krympts på en central axel (detta är det vanligaste fallet), eller skivor som gjutits, smitts och bearbetats direkt på enblocksrotorer. Krympmonterade skivor är vanligast i lågtrycksturbiner och mindre vanliga i mellantrycks- och högtrycksrotorer i små turbiner. För att undvika att nödvändiga krympmonteringspänningar försvinner eller att skivan blir lös till följd av relaxation, är skivans drifttemperatur begränsad till under 400–450 °C.

En ökad relativ risk för försprödning eller sprödbrott har observerats i rotorerna och skivorna under 1970- och 1980-talen i fråga om rotorerna som tillverkades på 1950 och 1960-talen. Efter det har materialförbättringar, t.ex. en balanserad kemisk sammansättning, en minskning av föroreningar och inneslutningar i materialet, samt tillverkningsteknologin såsom gjutning och värmebehandlingar gjort det möjligt att öka den kritiska defektstorleken hos sprickor och minska den motsvarande risken för sprickbildning och allvarliga sprödbrott. Förbättringar av provningsmetoderna och systematiska inspektioner efter tillverkningen har dessutom gett bättre möjligheter att upptäcka och karakterisera defekter i kvalitetskontrollen. Därför anses numera borrhålet i centrum inte alltid vara nödvändigt eller speciellt fördelaktigt för enblocksrotorer.

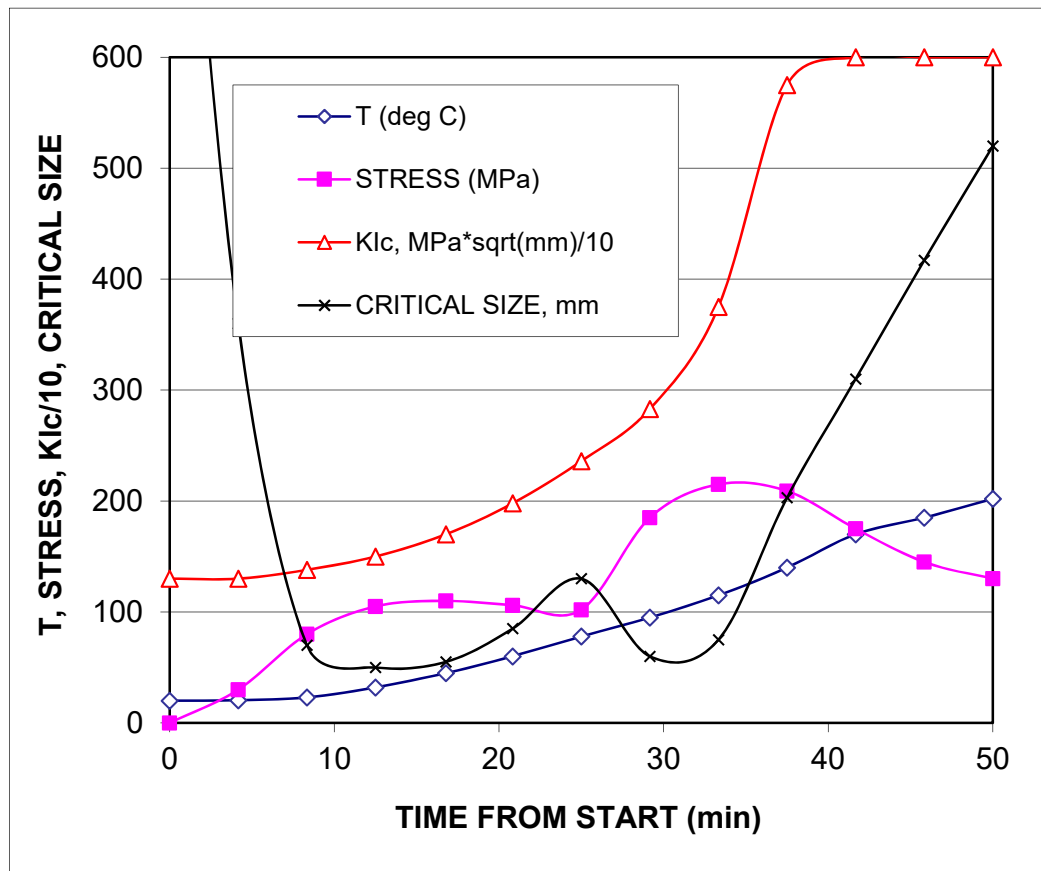
Figur 2.3.1-6 presenterar spänningsfördelningen, materialets seghet, temperatur och kritisk defektstorlek i en rotor (borrad yta) under en uppstart av turbinen efter mer än 100 000 drifttimmar. Den kritiska defektstorleken visar ett minimivärde som alltid borde vara betydligt större än det uppskattade maximivärdet som kan påträffas i komponenten. Den kritiska defektstorleken bestämmer kraven på detektering av defekter vid oförstörande provning.

Förutom defekter i centrum och i rotorerna och skivornas huvudkropp är även skovelfästena en potentiell plats för uppkomst av sprickor, se Figur 2.3.1-7.

Riskerna för brott till följd av försprödning och skador kan begränsas genom att rotorerna förvärms eller genom att förhindra att den kyls ned fullständigt under avställningar. Detta inverkar på två fördelaktiga sätt: för det första minskar en högre begynnelsestemperatur de termiska spänningarna som är proportionella till temperaturdifferenserna med omgivningen (även om detta kan kompenseras genom en snabb uppstart), och för det andra ökar en högre temperatur materialets seghet.

Rotorerna i radiella turbiner använder flera uppsättningar av roterande skovlar som är fästa vid två skivor som roterar i motsatt riktning. Skivorna kallas sidoplatser, och för att förhindra förlust av driftången kan turbinerna även vara försedda med labyrinthtättningsplattor. Dessa tättningsplattor är utsatta för slitage i drift.





Figur 2.3.1-6. Variation i den kritiska defektstorleken vid borrhålet inne i rotorn till en ångturbin under kallstart efter mer än 100 000 drifttimmar. Variationen i spänning och kritisk defektstorlek beror på tryckökning i början av uppstarten.

Figure 2.3.1-6. The variation of the critical defect size at the internal bore of a steam turbine rotor during a cold start, after more than 100 000 hours of service. The inflection in stress and critical defect size is due to increase in pressure well after the initial start.

#### Rotor- och skivmaterial

Typiska rotor- och skivmaterial och de egenskaper som krävs av dessa finns listade i Tabellerna 2.3.1-1 - 2.3.1-4. Med undantag för de nyaste och patenterade versionerna är materialen delvis standardiserade.

Bortsett från den krävda segheten, drag- och utmattningshållfastheten samt de tillverkningsegenskaper som fordras måste skivmaterialen i en HT/MT-rotor även vara tillräckligt kryptåliga vid drifttemperaturer över 400–450 °C. Låglegerade CrMo och CrMoV-stål har använts i stor utsträckning vid inloppsångtemperaturer på 500–540 °C, och 10–12 % Cr-stål vid temperaturer upp till 570–600 °C.

För större LT-rotorer och skivor måste materialet framför allt ha tillräckligt stor sträck- och utmattningshållfasthet för att kunna klara av laster under drift som inkluderar transienter. Likaså är det nödvändigt med tillräcklig seghet för att trygga säkerheten vid spricktillväxt och sprödbrott. Dessa stålsorter är i främsta hand låglegerade varianter och de innehåller ofta mer nickel än i fråga om HT-rotorer på grund av större krav på genomhårdning och seghet.

**Tabell 2.3.1-1. Viktiga mekaniska egenskaper hos material i HT/MT-rotorer och skivor (metalltemperatur upp till 450-560 °C; SEW 555, DIN 17240).**

| Material        | Rp0,2<br>MPa | Rm<br>MPa | A5 (L)<br>% | Z (L)<br>% | Seghet<br>J (ISO-V),<br>L | Max.<br>Temp. °C |
|-----------------|--------------|-----------|-------------|------------|---------------------------|------------------|
| 23 CrMo 5       | 400          | 550-700   | 18          | 40         | 47                        | 450              |
| 24 CrMoV 5 5    | 550          | 700-850   | 17          | -          | -                         | 540              |
| 21 CrMoV 5 11   | 550          | 700-850   | 17          | -          | -                         | 540              |
| 21 CrMoV 5 7    | 550          | 700-850   | 16          | 60         | 63                        | 540              |
| 20 CrMoNiV 4 7  | 550          | 700-850   | 17          | 40         | 31                        | 540              |
| 28 CrMoNiV 4 9  | 550          | 700-850   | 17          | 40         | 31                        | 540              |
| 30 CrMoNiV 5 11 | 550          | 700-850   | 17          | 40         | 31                        | 540              |
| X 21 CrMoV 12 1 | 600          | 750-900   | 16          | 40         | 24                        | 570              |

**Tabell 2.3.1-2. Sammansättning (vikts-%) av material i HT/MT-rotorer och skivor (SEW 555, DIN 17240).**

| Material        | C             | Si        | Mn            | Cr            | Mo            | Ni            | V             |
|-----------------|---------------|-----------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 23 CrMo 5       | 0,20-<br>0,28 | 0,30 max. | 0,30-<br>0,80 | 0,90-<br>1,20 | 0,20-<br>0,35 | 0,60<br>max   | -             |
| 24 CrMoV 5 5    | 0,20-<br>0,28 | 0,25      | 0,45          | 1,35          | 0,55          | 0,60<br>max   | 0,2           |
| 21 CrMoV 5 11   | 0,17-<br>0,25 | 0,45      | 0,40          | 1,35          | 1,0           | 0,60<br>max   | 0,3           |
| 21 CrMoV 5 7    | 0,17-<br>0,25 | 0,15-0,35 | 0,35-<br>0,85 | 1,2-1,5       | 0,65-<br>0,80 | -             | 0,25-<br>0,35 |
| 20 CrMoNiV 4 7  | 0,17-<br>0,25 | 0,30 max  | 0,30-<br>0,80 | 1,1-1,4       | 0,8-1,0       | 0,50-<br>0,75 | 0,25-<br>0,35 |
| 28 CrMoNiV 4 9  | 0,25-<br>0,30 | 0,30 max  | 0,30-<br>0,80 | 1,1-1,4       | 0,8-1,0       | 0,50-<br>0,75 | 0,25-<br>0,35 |
| 30 CrMoNiV 5 11 | 0,28-<br>0,34 | 0,30 max  | 0,30-<br>0,80 | 1,1-1,4       | 1,0-1,2       | 0,50-<br>0,75 | 0,25-<br>0,35 |
| X21 CrMoV 12 1  | 0,20-<br>0,26 | 0,50 max  | 0,30-<br>0,80 | 11,0-<br>12,5 | 0,8-1,2       | 0,30-<br>0,80 | 0,25-<br>0,35 |

**Tabell 2.3.1-3. Viktiga mekaniska egenskaper för material i LT-rotorer och skivor (metalltemperatur upp till ca 350 °C i praktiken, SEW 555 används även för rotorer i generatorer).**

| Material        | Rp0,2<br>MPa | Rm<br>MPa | A5 (L)<br>% | Z (L)<br>% | Seghet<br>J (ISO-V), L/T/Q |
|-----------------|--------------|-----------|-------------|------------|----------------------------|
| 23 CrNiMo 7 4 7 | 600          | 750-900   | 17          | 40         | 47/35/24                   |
| 28 NiCrMo 5 5   | 500          | 670-820   | 17          | 40         | 55/39/24                   |
| 26 NiCrMoV 8 5  | 600-650      | 800-900   | 17-18       | 40         | 55-63/39-47/24-31          |
| 26 NiCrMoV 11 5 | 600-750      | 750-1050  | 16-18       | 40         | 63-71/55-63/39-47          |
| 26 NiCrMoV 14 5 | 700-850      | 850-1100  | 15-18       | 40         | 63-71/55-63/39-47          |

**Tabell 2.3.1-4. Sammansättning (vikt-%) av material i LT-rotorer och skivor (SEW 555).**

| Material        | C         | Si       | Mn        | Cr      | Mo        | Ni       | V         |
|-----------------|-----------|----------|-----------|---------|-----------|----------|-----------|
| 23 CrNiMo 7 4 7 | 0,20-0,26 | 0,30 max | 0,50-0,80 | 1,7-2,0 | 0,60-0,80 | 0,90-1,2 | -         |
| 28 NiCrMo 5 5   | 0,26-0,32 | 0,30 max | 0,15-0,40 | 1,0-1,3 | 0,25-0,45 | 1,0-1,3  | 0,15 max  |
| 26 NiCrMoV 8 5  | 0,22-0,32 | 0,30 max | 0,15-0,40 | 1,0-1,5 | 0,25-0,45 | 1,8-2,1  | 0,05-0,15 |
| 26 NiCrMoV 11 5 | 0,22-0,32 | 0,30 max | 0,15-0,40 | 1,2-1,8 | 0,25-0,45 | 2,4-3,1  | 0,05-0,15 |
| 26 NiCrMoV 14 5 | 0,22-0,32 | 0,30 max | 0,15-0,40 | 1,2-1,8 | 0,25-0,45 | 3,4-4,0  | 0,05-0,15 |

Historiskt sett är totala brott på rotorer relativt sällsynta. Rotorstålet har i snitt blivit renare med tiden med avseende på t.ex. inneslutningar och föroreningar som ger upphov till temperaturrelaterad sprödhet (Mn, Si, P, Sb, Sn och As). Detta har förbättrat segheten och ökat den kritiska defektstorleken, som i vissa gamla rotor- och skivmaterial ibland varit liten i jämförelse med den oförstörande provningens möjligheter att upptäcka defekter. Renhet med avseende på inneslutningar i materialen kan även minska gropfrätning i LT-rotorer, där frätgroparna kan leda till sprickbildning till följd av spänningskorrosion eller korrosionsutmattning.

Med det ökande intresset för kombimaskiner har rotorer med en cylinder där samma rotor är ihopsatt av en kryptålig HT-del och en LT-del med låglegerade stålsorter tagits fram.

#### 2.3.1.2.1 Skador i rotorer och skivor

Skademekanismerna och deras utveckling beror normalt både på belastningsmönstren och på den lokala omgivningen. Temperaturfördelningen längs rotorn bestäms, åtminstone vid konstant drift, i första hand av ångexpansion. Ångexpansionen leder även till att föroreningar separeras, speciellt i LT-turbinområden där vattendroppar utvecklas, blir större och vidrör turbinytan, varigenom avlagringar bildas tillsammans med en lokalt anrikad korrosiv ytomgivning. På grund av att spänningarna, temperaturerna och den kemiska omgivningen varierar beror skademekanismerna hos rotor och skivor på både platsen i rotorn och förhållandena under den specifika driftsituationen (och avställningsperioderna).

En rotorskada indikeras under drift ofta t.ex. genom vibrationsmätningar. En detaljerad analys skulle dock kräva avställning och åtminstone delvis demontering. I Tabell 2.3.1-5 presenteras de huvudsakliga skademekanismerna och deras viktigaste egenskaper.

Tabell 2.3.1-5. Grupper av huvudsakliga skademekanismer i rotor och skivor i ångturbiner.

| Mekanism                                   | Plats                     | Observation genom       | Gränser                                 |
|--------------------------------------------|---------------------------|-------------------------|-----------------------------------------|
| Deformation / böjning                      | HT-del, centrum           | Dimensioner, vibration  | 1-2 % eller specifik                    |
| Erosion, kontaktnötning, erosionskorrosion | Inlopp, tätningar, LT-del | OFP, dimensioner        | Specifika gränser                       |
| Sprickor                                   | Borrhål, skovelfäste      | OFP, läckage, vibration | Specifika storleksgränser <sup>1)</sup> |
| Uppmjukning, hårdnande                     | HT-del, reparationer      | Hårdhet, replikprov     | Indirekt specificerad                   |
| Försprödning                               | Var som helst             | Slagprovning, (NDT)     | Se SEW 555 <sup>2)</sup>                |

<sup>1)</sup> från fall till fall, fastställd för NDT-specifikationer

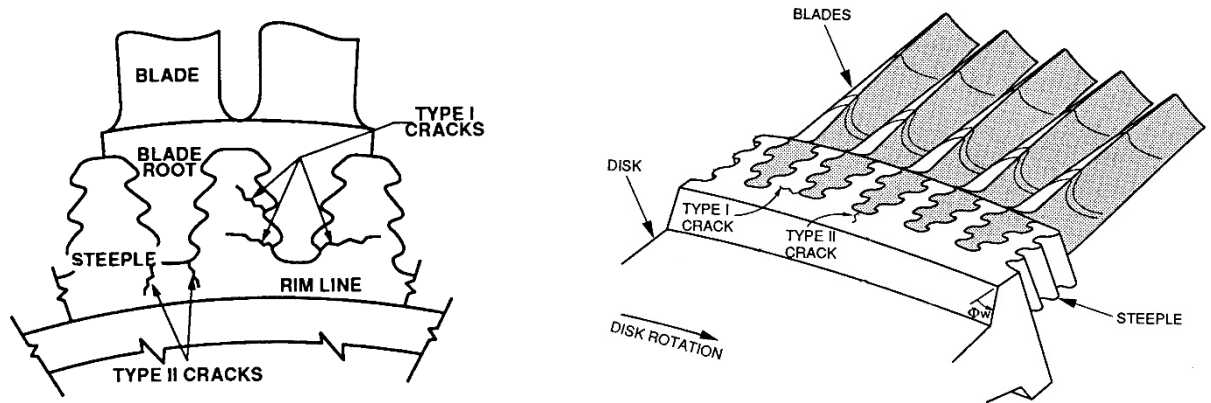
<sup>2)</sup> gäller nya material

Högtrycks- och mellantryckssektionerna måste motstå de högsta temperaturerna, och då det gäller HT-delen, även de största trycken i turbinen. I den heta ändan är temperaturerna vanligtvis tillräckligt höga för att kräva att konstruktionen beaktar krypning, och krypning är en av de viktigaste skademekanismerna vid drift med konstant last. Kryputsatta områden är områdena vid turbinens inloppssektion, kontrollstegen samt de första löpskovlarna och stationära ledskenorna. Krypning är inte en vanlig orsak till turbinhaveri så länge drifttiden håller sig inom rimliga gränser (upp till 200 000–250 000 h).

Parallellt med detta måste alla turbinsektioner kunna motstå utmattningsscykler till följd av uppstartningar, avställningar och andra belastningstransienter. Andra vanliga skademekanismer är yt slitage på grund av partiklar (t.ex. oxider) som ingår i ångflödet och lokala slagskador förorsakat av ett externa eller interna föremål av metall eller annat fast material (foreign object damage FOD respektive domestic object damage DOD), även om dessa är vanligare i skovlarna).

I områden med tillräcklig ångexpansion, hög dragspänning och känsliga höghållfasta material kan ångkondensering till små vattendroppar anrika föroreningar och ge upphov till spänningskorrosion. Risken för spänningskorrosion gäller i normala fall främst LT-turbiner vid eller nära områden där första kondenseringen i rotor, skivor (och skovlar) sker (Wilson-zonen). Medan anrikningsmekanismen tillhandahåller tillräckligt mycket föroreningar oberoende av ångans renhet, kan spänningskorrosion i rotorn undvikas genom att man sörjer för att de riskutsatta ytornas temperaturer fortlöpande håller sig väl ovanom de kritiska kondenseringstemperaturerna (som i normala fall är ca 50–80 °C) i syfte att förhindra att de ens tidvis utsätts för vattendroppar. Detta är lättare i fråga om mottrycksturbiner som kan drivas utan att våt ånga vidrör LT-rotorn eller skivornas ytor. Andra sätt att begränsa spänningskorrosion är t.ex. att undvika material med mycket hög sträckgräns, som kan innebära en ökad risk för spänningskorrosion. Det är speciellt att observera att spänningskorrosion kan uppträda även om tillverkaren inte ser något samband med spänningskorrosion när sprickor uppkommer. Detta kan t.ex. vara förknippat med försäkringsbolagens allmänna policy att förkasta ersättningsanspråk i fall av spänningskorrosion, eftersom en sådan skada ofta anses vara en följd av naturlig

nötning i stället för en oväntad skada. Generellt sett beror känsligheten för spänningsskorrosion på ångkemin. Anläggningsägaren samt drift och underhållspersonalen kan påverka risken betydligt genom att hålla ångkemin inom kontroll.



Figur 2.3.1-7. Typiska platser för sprickor på skovelrotfästen i turbinskivan.

Figure 2.3.1-7. Typical locations of the blade root attachment cracks in the turbine disk.

Utmattningsbrott uppkommer vanligen på områden där sträckgränsen uppnås av driftspänningar, främst till följd av termiska spänningar. En spänningsväxling i nivå med sträckgränsen i både drag och tryck genererar vid avlastning även restspänningar jämförbara med sträckgränsen, och efter återbelastning uppkommer åtminstone lokalt plastisk deformation som leder till utmattningsbrott med ökande antal cykler. Ifall drifttemperaturen befinner sig i krypområdet utvecklas ytterligare deformation genom krypning eller kryprelaxation och skada uppkommer till följd av kombinerad krypning och utmattning. Ifall krypning bidrar till skadeutvecklingen relaxeras eventuella restspänningar under drift, vilket medför en skadeutveckling under betydligt lägre spänningsväxling än i fallet utan krypning men krypskada ackumuleras för varje cykel, se vidare i **avsnitten 1.5.1.3 och 1.5.1.4** om termisk utmattning respektive kryputmattning. Skadan uppträder slutligen som sprickbildning, vanligtvis på rotorytor på platser med spänningskoncentrationer såsom värmefåror, skovelfästen (se Figur 2.3.1-7) eller vid centrumhålet, men ofta även på ställen där det finns något tillverkningsfel såsom sprickor, porer eller inneslutningar (föroreningar av icke-metallisk art inne i materialet).

Ställen där skador observerats i LT-turbiners skivor är t.ex. kilspåren mellan skivan och axeln samt skovelfästen där en anrikning av föroreningar från kondensångan kan ge upphov till sprickbildning till följd av spänningsskorrosion och korrosionsutmattning. Sprickbildning (eller relaxation) vid skivans centrum kan leda till att krympgreppet mellan skivan och axeln blir löst och att skivans nominella frekvens ändras. I kombination med erosionsskador på LT-skovlarna som förändrar deras nominella frekvenser finns det en risk för resonans och skovelbrott på grund av högcykelutmattning.

Uppkomst av sprickor i LT-skovelfästena härrör i de flesta fallen från spänningsskorrosion eller korrosionsutmattning. Sprickorna börjar vanligen bildas på

ställen med spänningskoncentration vid "grantoppsfästet" på grund av kombinerad hög spänning och korrosiva föroreningar som anrikats med kondensågan.

Försprödning av materialet minskar rotners förmåga att motstå spänningar och skador, och ökar därmed sannolikheten för snabb uppkomst av brott, i synnerhet under kallstarter. Försprödning minskar alltid den kritiska defektstorleken för en viss driftspänning, temperatur och driftsituation (se Figur 2.3.1-6).

#### 2.3.1.2.2 Provning av rotor och skivor

Provning av rotor och skivor i ångturbiner syftar för det mesta till att upptäcka och bedöma indikationer på skador såsom deformation, sprickbildning, nötning och försprödning.

Visuell provning kan avslöja eventuella avlagringar på ytan, missfärgning och synliga skador. Till en viss utsträckning (begränsad av åtkomst) kan en visuell provning, ofta i kombination med endoskopinspektion (boroskop), användas för inspektion av en viss del av rotn utan att turbinhuset behöver öppnas. Mer fullständig oförstörande provning (NDT) kräver dock att turbinen öppnas och att rotor och skivor inspekteras med hjälp av magnetpulverprovning (MT) eller penetrantprovning (PT) för avsökning av ytdefekter, och ultraljudsprovning (UT) för avsökning av inre defekter och bestämning av defektens storlek. Provningsen bör täcka alla huvudsakliga områden där det föreligger en risk för sprickbildning, såsom skovelfästningar, kontaktyta mellan skiva och rotorkropp, värmningsspår, mittersta sektionen av rotns centrum och centrumhålens ytor samt alltid där tidigare inspektion gett indikationer eller där möjliga indikationer baserade på vibrationsmätningar kan observeras. Även replikprovning kan utföras, speciellt i inloppsområdena där risken för krypskador är störst. För att få en täckande undersökning krävs ett relativt stort antal repliker.

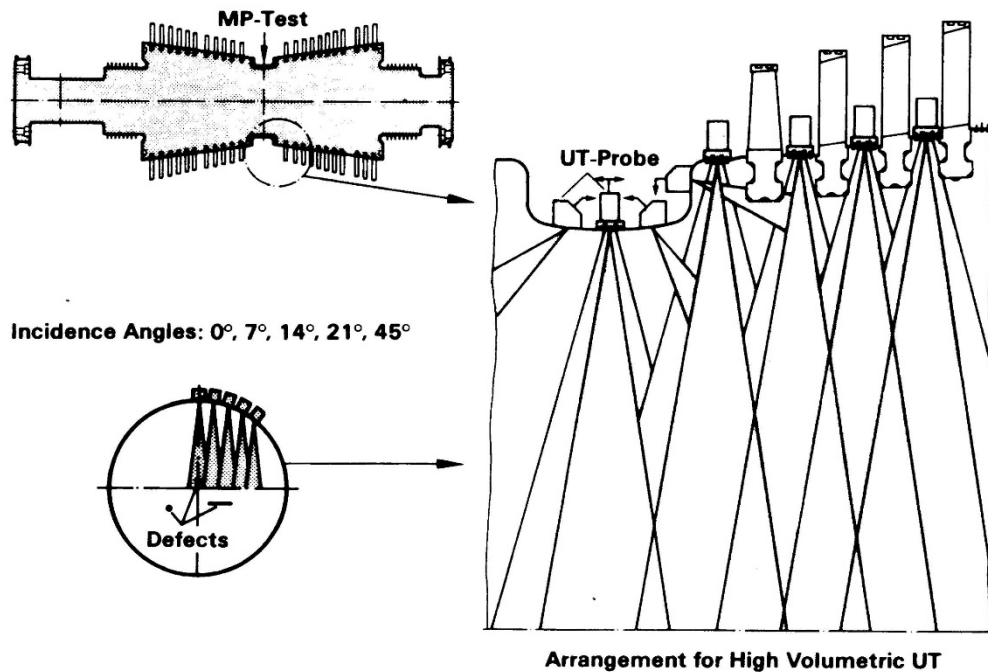
Möjliga metoder för att lokalisera de högst belastade områdena är spännings- och temperaturanalys med hjälp av datorprogram och hårdhetsprovning. Hårdhetsprovning lämpar sig bäst för att lokalisera de termiskt mest belastade områdena speciellt i HT/MT-rotorer. Normalt är hårdheten högst i rotns kalla ända och lägst nära ånginloppet.

För magnetpulverprovning kan magnetisering tillämpas antingen genom en likspänningskabel tvinnad på rotn eller, mer lokalt, genom att okmagnetisering används.

Ifall platsen i fråga är tillgänglig kan även virvelströmsprovning (ET) användas för spricksökning i skovelfästet. Ifall skivorna är krympmonterade, kan mätning av skivans nominella frekvens indikera antingen om krympfogen fortfarande fungerar som den skall och inte har blivit lös genom relaxation. Detta kräver antingen kunskap om den ursprungliga nominella frekvensen (via dokument, tillverkaren eller analys) eller tillgång till en jämförbar skiva, t.ex. i symmetriska LT-turbiner med två sektioner. Sådana mätningar ingår dock vanligtvis inte i underhållsprogram utan speciell orsak.

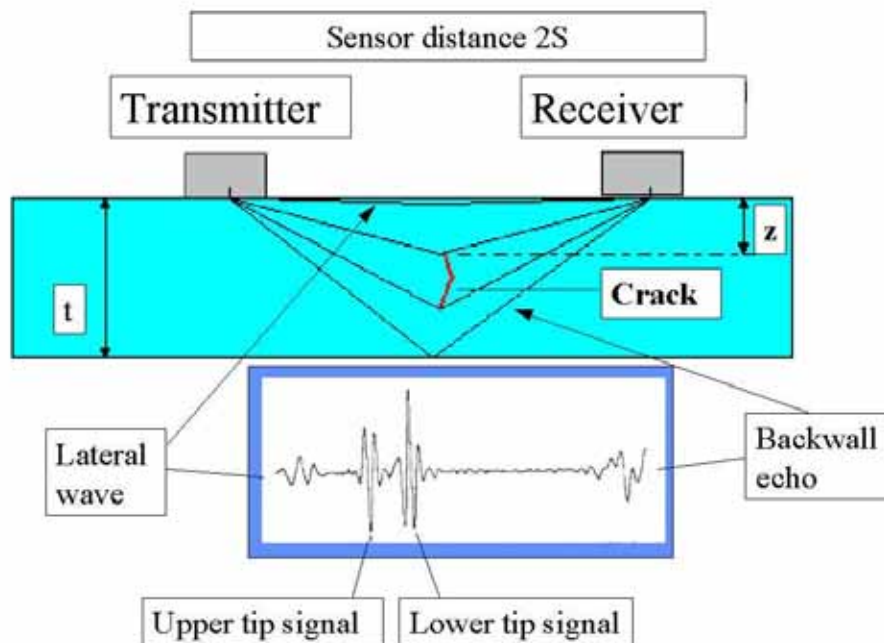
För att komma åt att göra de nödvändiga inspektionerna används vanligen ett flertal inspektionsställen och sändarvinklar vid provning med ultraljud (Figur 2.3.1-8). I den mycket använda klassiska pulsekometoden kan defektens storlek bestämmas genom att den givna signalens amplitud jämförs med en referenssignal t.ex. från ett flatbottnat hål i en kalibreringskropp. När det gäller stora rotorkroppar uppnås dock bättre resolution och tillförlitlighet i fråga om t.ex. defektlokalisering och bestämning av

defektens storlek genom användning av löptidsdiffraktionstekniken (TOFD), se Figur 2.3.1-9. Denna metod använder symmetriskt utplacerade UT-sändare- och mottagargivare för upptäckt av en potentiell defekt. Givarna upptäcker olikheterna i signaltiderna från defektens ända. Genom att tillämpa diffraktion av akustiska vågor kan både sändare och mottagare befinna sig på samma sida.



Figur 2.3.1-8. Principen för ultraljudsprovning i centrum av en enblocksrotor.  
Figure 2.3.1-8. Principle of ultrasonic testing of the centre of a monobloc rotor.



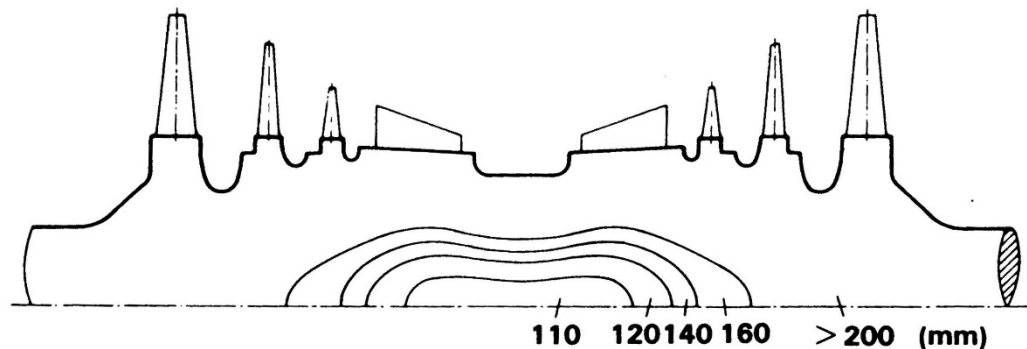


Figur 2.3.1-9. Principen för ultraljudsprovning av skador med användning av löptidsdiffraktionstekniken (TOFD).

Figure 2.3.1-9. The principle of ultrasonic testing of defects using TOFD.

Termisk försprödning kan inte direkt observeras genom NDT, med undantag av att sprödhet i vissa fall kan uttolkas i mikrostrukturen genom replikprovning och eventuellt (men inte nödvändigtvis) även förknippas med hög hårdhet genom in situ-hårdhetsprovning. Vanligtvis kan dock graden av försprödning bestämmas tillförlitligt endast genom förstörande provning med avseende på seghet. Förstörande provning kan begränsas av att det inte går att ta prov på önskvärda positioner. Provtagning kan dock ofta göras från lätt belastade delar av rotorn, t.ex. vid balanseringshålén, centrumhålén kanter eller yttre änden av rotorns centrum. Provtagning från både den heta och kalla änden av HT/MT-rotorer, om möjligt, är att rekommendera för jämförelse. Den rekommenderade minimimaterialmängden som behövs för provning av slagsegheten är ca 10–15 stycken  $5 \times 5 \times 25$  mm prover, vilket motsvarar mängden av ungefär 1,5 traditionella Charpy-V-standardprover. Även skivformade miniatyrprover har använts, även om de inte förefaller vara lika lämpliga för ändamålet i fråga.

Seghetsfunktionen uppmätt som en funktion av temperaturen ger tillsammans med en spänningsanalys av rotorn den väsentliga informationen som behövs för att bedöma den kritiska brottstorleken och de tillåtna hastigheterna vid uppstartningen (Figur 2.3.1-10). För ytterligare bedömning av rotorns återstående livslängd kan små krypprover och prover för krypsprickpropagering även användas för att få reda på dessa materialegenskaper. Om material från rotorn eller skivan i fråga inte finns tillgängligt är det ibland möjligt att använda material eller resultat från en jämförbar rotor av samma tillverkare och årsmodell. I annat fall måste resultaten underbyggas genom mindre specifika och mindre relevanta litteraturredata.



Figur 2.3.1-10. Ett exempel på områdena för kritiska defekstorlekar (angivna som diametern av ekvivalenta flatbottnade hål (EFH)) fastställda för rotorns centrum i en LT-turbin.

Figure 2.3.1-10. An example of the regions of critical defect sizes (given as equivalent flat bottom hole (EFH) diameter) defined for the centre of a LP turbine rotor.

#### 2.3.1.2.3 Återstående livslängd hos rotor och skivor

Bedömningen av livslängden hos rotor och skivor i turbiner kan göras på något varierande sätt även om grundprinciperna är likadana. En allmän sammanfattning av de olika metoderna enligt EPRI, VGB och andra framgår i [kapitel 1.3](#) och i Värmeforskrapport 554 (Wrangsten 1995). Analysen kan indelas i tre faser:

1. bedömning av drift- och underhållshistorian samt av den framtida driften;
2. konditionsbedömning med hjälp av NDT och materialprovningssmetoder; och
3. bedömning av den återstående livslängden med hjälp av resultat från konditionsbedömningen och en tillräckligt detaljerad analys av spänningar och tillväxt av observerade sprickor och annan skada

Mycket ofta innefattar en bedömning av livslängden en analys av den tillåtna defekstorleken, bedömning av tillväxthastigheten i fråga om observerade sprickor samt den tid det tar tills skadan i fråga uppnått gränsen för tillåten storlek. Vidare bedöms verkningen av fortsatt drift på den tillåtna storleken t.ex. genom förspärnings- och belastningsmodeller. Den kritiska defekstorleken beror vanligtvis på de högsta spänningar som rotorn och dess skivor är utsatta för i förening med materialets brottseghet och eventuella fortsatta förspärning. Sprickorna kan växa genom krypning, utmattning eller kryptutmattning i HT-delen (Figur 2.3.1-11), och genom utmattning, spänningskorrosion eller korrosionsutmattning mot LT-delen av turbinen.

När det gäller bedömning av krypning och utmattning i HT-delen tillämpas en enkel men mycket använd princip som grundar sig på nedanstående antagande vid tidpunkten för brott

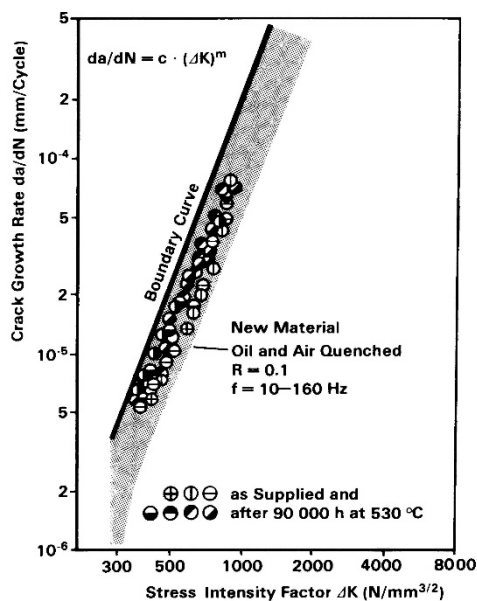
$$\sum (t_i/t_{Ri}) + \sum (N_j/N_{Rj}) \leq 1 \quad (1)$$

där  $t_i$  och  $t_{Ri}$  är den tid som förflutit respektive tiden till krypbrott under samma spännings- och temperaturförhållanden  $i$ , och  $N_j$  och  $N_{Rj}$  är antalet cykler respektive antalet cykler till utmattningsbrott med samma temperatur och belastningsamplitud under förhållandena  $j$ . Summan av krypdelskador,  $t_i/t_{Ri}$ , plus summan av

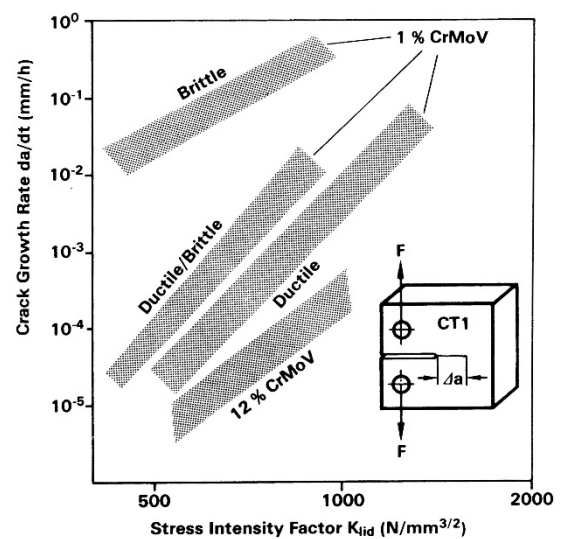
utmattningsdelskador,  $N_i/N_{Ri}$ , utgör den förbrukade fraktionen av livslängden. När det gäller bedömningen av en turbins livslängd utgår de flesta tillverkare ifrån att en kall start-stoppcykel motsvarar minst 20–30 drifttimmar.

Sprickbildningen vid LT-skovelinfästningar eller skivornas kilspår är oftast förorsakad av spänningskorrosion eller korrosionsutmattning. Spänningskorrosion främjas av material med en hög sträckgräns (omkring 900 MPa eller mer), och försprödning som resulterar i en liten kritisk brottstorlek kan begränsa livslängden både genom att den förkortar tillväxttiden fram till denna gräns och genom att den minskar säkerhetsfaktorn förknippad med möjligheten att upptäcka felet vid NDT.

Bedömningen av hastigheten hos spänningskorrosion eller korrosionsutmattning är förknippad med stor osäkerhet. Tillväxthastigheterna beror i hög grad på den kemiska omgivningen. Av dessa orsaker är bedömningen av livslängd grundad på spänningskorrosion eller spricktillväxthastigheter vid korrosionsutmattning mindre vanlig än t.ex. vid enbart utmattning. Spänningsanalys och kännedom om de områden där kondenseringen börjar kan emellertid vara till hjälp vid identifikation av de kritiska områdena vid inspektioner eller annat underhåll.



a)



b)

Figur 11. Typiska hastigheter för a) spricktillväxt vid utmattning; b) spricktillväxt vid krypning i stål använda för HT/MT-rotorer(1CrMoV).

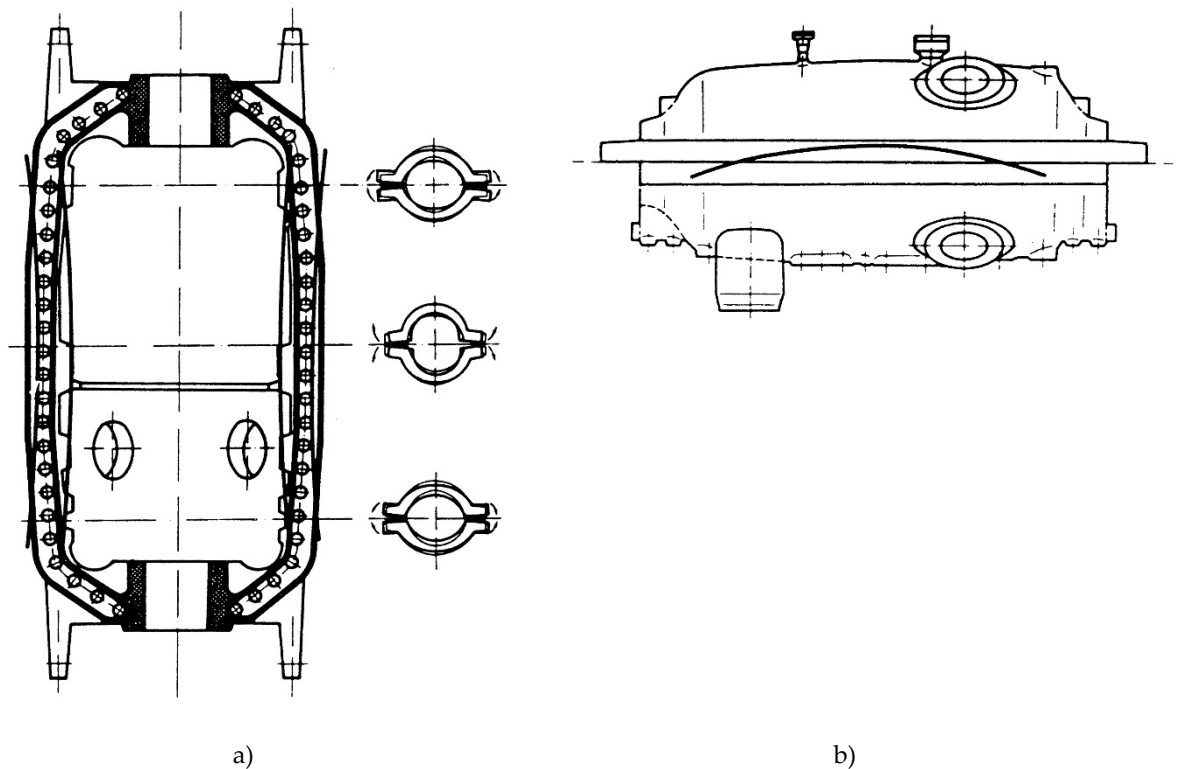
Figure 11. Typical rates of a) fatigue crack growth; b) creep crack growth in HP/IP rotor steels (1CrMoV).

### 2.3.1.3 Turbinhus

#### Allmänna egenskaper

Turbinhusen innesluter ångan och styr den till skovlarna. De utgör även fäste för styrledskenorna. I synnerhet i stora turbiner och högtrycksturbiner är turbinhusen indelade i inre och yttre hus, vilket minskar den mekaniska och termiska belastningen av det stora yttre skalet och därigenom även de totala kostnaderna.

De största spänningarna och deformationerna i skalen uppkommer vanligen under kallstarter och andra transienter huvudsakligen till följd av temperaturskillnader i skalkonstruktioner med tjocka väggar. Den termiska förvridning (Figur 2.3.1-12) som därvid uppstår kan ge upphov till skador på huset, i synnerhet om det redan förekommer defekter i det. Att undvika en omfattande förvridning är även viktigt för att huvudflänsens delningsplan skall hållas tätt och för att det tillbörliga radialspelet skall hållas oförändrat så att det inte uppstår kraftig kontakt av skovlarnas eller ledskenornas spetsar mot huset eller rotern.



Figur 2.3.1-12. Förvridning av ett turbinhus under uppstartning till följd av termisk expansion: a) ovanifrån; b) från sidan av turbinen.

Figure 2.3.1-12. Bending of a turbine casing during start-up due to thermal expansion: a) from above; b) from the side of the turbine.

*Turbinhusmaterial*

Tabellerna 2.3.1- 6 och 2.3.1-7 presenterar typiska turbinhusmaterial och deras egenskaper. Materialförteckningen är på inget vis fullständig, utan den presenterar materialtyper som använts i stor utsträckning för turbinhus.

**Tabell 2.3.1-6. Egenskaper hos turbinhusmaterial (DIN 1694, DIN 17245)**

| Material             | Rp0,2<br>MPa | Rm<br>MPa | A5<br>% | Seghet<br>J (ISO-V) | Turbin-<br>sektion |
|----------------------|--------------|-----------|---------|---------------------|--------------------|
| GGG-40.3             | 240          | 370       | 12      | 12/9 (DVM)          | IP/LP              |
| GS-C 25              | 245          | 440-590   | 22      | 24                  | HP/LP/LP           |
| GS-22 Mo 4           | 245          | 440-590   | 22      | 24                  | HP/IP/LP           |
| GS-17 CrMo 5 5       | 315          | 490-640   | 20      | 24                  | HP/IP              |
| GS-18 CrMo 9 10      | 400          | 590-740   | 18      | 40                  | HP/IP              |
| GS-17 CrMoV 5 11     | 440          | 590-780   | 15      | 24                  | HP/IP              |
| G-X 22 CrMoV 12<br>1 | 590          | 690-880   | 15      | (21 DVM)            | HP/IP              |

**Tabell 2.3.1-7. Sammansättning (vikt-%) av turbinhusmaterial (DIN 1694, DIN 17245).**

| Material               | C         | Si        | Mn        | Cr        | Mo                    | V         | Turbin   |
|------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------------------|-----------|----------|
| GGG-40.3 <sup>1)</sup> | (3.0-3.5) | (1.5-2.0) | (1.0 max) | (0.3 max) | -                     | -         | IP/LP    |
| GS-C 25                | 0,18-0,23 | 0,30-0,60 | 0,50-0,80 | 0,3 max   | -                     | -         | HP/IP/LP |
| GS-22 Mo 4             | 0,18-0,23 | 0,30-0,60 | 0,50-0,80 | 0,3 max   | 0,35-0,45             | -         | HP/IP/LP |
| GS-17 CrMo 5 5         | 0,15-0,20 | 0,30-0,60 | 0,50-0,80 | 1,0-1,5   | 0,45-0,55             | -         | HP/IP    |
| GS-18 CrMo 9 10        | 0,15-0,20 | 0,30-0,60 | 0,50-0,80 | 2,0-2,5   | 0,90-1,10             | -         | HP/IP    |
| GS-17 CrMoV 5 11       | 0,15-0,20 | 0,30-0,60 | 0,50-0,80 | 1,2-1,5   | 0,90-1,10             | 0,20-0,30 | HP/IP    |
| G-X 22 CrMoV 12 1      | 0,20-0,26 | 0,10-0,40 | 0,50-0,80 | 11,3-12,2 | 1,0-1,2 <sup>2)</sup> | 0,25-0,35 | HP/IP    |

<sup>1)</sup> kemisk sammansättning inte specificerad.

<sup>2)</sup> även med 0,7-1,0 % Ni.

### 2.3.1.3.1 Skador i turbinhus

Typiska skademekanismer hos ångturbinhus är sammanfattade i Tabell 2.3.1-8.

**Tabell 2.3.1-8. Grupper av huvudsakliga skademekanismer hos ångturbinhus.**

| Mekanism                                                            | Plats                                   | Observation genom       | Gränser                                 |
|---------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|-------------------------|-----------------------------------------|
| Deformation / böjning                                               | Inre delningsplan                       | Dimensioner, vibration  | 1-2 % <i>töjning</i> eller specifik     |
| Erosion, erosionskorrosion vattendroppskorrosion och kontaktnötning | Inre ytor                               | OFP, dimensioner        | Specifika gränser                       |
| Sprickor                                                            | Centrumhål, ledsken- och skovelfästning | OFP, läckage, vibration | Specifika storleksgränser <sup>1)</sup> |
| Mjuknande, hårdnande                                                | Het ände, reparationer                  | Hårdhet, replikprov     | Indirekt specificerad                   |
| Försprödning                                                        | Var som helst                           | Slagprov, (replikprov)  | Materialprover <sup>2)</sup>            |

<sup>1)</sup> Specifikt från fall till fall, fastställt för NDT-specifikationer.

<sup>2)</sup> Gäller nya material.

Den vanligaste skadan som eventuellt begränsar livslängden hos turbinhus beror på termisk utmattning, som leder till sprickbildning och spricktillväxt hos existerande tillverkningsfel (gjutningsfel). Förutom dessa kan även krypningseffekter komma i fråga i innerhuset av heta områden i HT/MT-turbiner.

Sprickbildning kan härröra från termisk försprödning som kan uppstå vid drift eller ibland under tillverkning eller reparationer, om t.ex. svetsning eller värmebehandlingar misslyckas. Sprickbildning observeras oftast i områden där det från förut finns tillverkningsfel (eller reparationsfel), andra spänningskoncentrationer och nära ånginloppet och -utloppet. Gamla reparationssvetsfogar, i synnerhet inom värmeutsatta områden, är en källa till sprickbildning till följd av restspänningar från svetsningen. Innerhuset förefaller vara något mer utsatt för sprickbildning än det yttre, vilket delvis beror på högre temperaturer och temperaturdiffenser under transienter. Även om sprickbildning är vanlig förorsakar den för det mesta inga större haverier. En orsak till detta är de relativt små konstruktionsspänningarna i gjutna hus.

En annan vanlig och (till sina konsekvenser) oftast mycket allvarigare typ av skada är förknippad med termiskt relaterade eller kryprelaterade deformationer i husen. Detta är oftast ett problem vid delningsplanet eller vid spelen vid skoveltätningarna. Deformation (eller ojämn yta) kan leda till driftstopp på grund av antingen yttre eller inre ångläckage, om det inre skalet läcker. En kraftig deformation kan kräva maskinbearbetning av turbinhuset. Deformation av skalet kan även föranleda av nötningsskador på skovlarna, labyrinttätningarna och rotorn.

### 2.3.1.3.2 Provning av turbinhus

Största delen av underhålls- och livslängdsrelaterad provning av turbinhus är oförstörande provning grundad på:

- Visuell provning-och måttinspektion; och
- ytinspektion med hjälp av magnetisk partikelprovning (MT) eller penetrant provning (PT).

Ifall krypskador (eller kryprelaxeringsskador) misstänks i de hetaste områdena kan de undersökas noggrannare genom replikprovning. Om sprickor på ytan upptäcks kan ytterligare provning vara nödvändig, normalt ultraljudsprovning (UT), för att bestämma omfattningen och storleken av skadorna. Det bör observeras att gjutna eller gjutna och smidda skal normalt innehåller relativt stora ursprungliga fel som uppkommit vid gjutningen, och de flesta av dessa (men inte nödvändigtvis alla) har vanligtvis reparerats genom svetsning. På grund av relativt låg konstruktionsspänning uppskattas många defekter huvudsakligen vara latenta, även om de kan växa.

Bedömningen av turbinhusets dimensioner vid underhåll riktar speciellt in sig på följande:

- deformation och kondition i fråga om delningsplanet, som skall vara tätt fäst under drift, med beaktande av den motsvarande termiska expansionen; och
- skovlarnas spel i syfte att undvika ångförluster och omfattande skador på grund av kontakt

Alla dessa inspektioner kräver att turbinen ställs av och, i de flesta fall, att huset måste öppnas. Därför sker en övergripande provning av husen rätt sällan.

#### 2.3.1.3.3 Återstående livslängd hos turbinhus

Bedömning av den återstående livslängden hos skal koncentrerar sig främst på att bedöma effekten av lågcykelutmattning (LCF) från termiska transienter och trycktransienter under den gångna och den kommande drifttiden. Detta görs genom dokumentering av uppstartningar och avställningar samt den termiska historien under transienterna. Endast de innerhus av HT/MT-turbinerna kan drivas vid temperaturer där kryplivslängden kan vara av intresse, och i fråga om den heta inloppsänden av dessa hus kan en liknande analys av kryp-utmattningslivslängden som i fråga om HT/MT-rotorer vara intressant.

Turbiner är i dag ofta utrustade med ett styrprogram som beräknar den termiska töjningen (eller spänningen) utgående från uppmätta temperaturdifferenser och signaler från virvelströmmsgivare som följer upp den relativa (normalt axiella) positionen mellan rotor och skal. Resultaten används för övervakning och styrning av lastförändringshastigheten under uppstarter och stopp av turbinen, eller åtminstone för att sörja för larm- och nödavställningsgränser för driftkontrollen. Den information styrprogrammet använder är inte nödvändigtvis sparad eller annars användbar för ändamål som avser livslängdsbedömning, men den kan ofta modifieras för att ge värdefulla indikationer på drifthistorien.

#### 2.3.1.4 Skovelsystem

##### *Allmänna egenskaper*

Turbinskovlarnas uppgift är att överföra och konvertera energiinnehållet i ångan till mekanisk rotation av turbinens rotor. Skovelsystemet består av roterande skovlar fästade vid rotorskivorna och fast beskovling, ledskenor, fästade på turbinhuset som utgör mellanväggar till rotorstegen (de skovelförsedda rotorskivorna). På grund av



centrifugalkraften erhåller roterande skovlar en betydande radiell dragkraft som ställer högre hållfasthetskrav på dessa än på de fasta ledskenorna.

Skovelsystemet är även utsatt för olika belastningsbetingelser beroende på ångförhållandena. I HT/MT-sektionerna är denna belastning främst termisk, och speciellt i HT-sektionerna även mekanisk till följd av högt tryck. Partiell ångkondensering som bildar små vattendroppar kan förekomma redan i MT-sektionen (ifall en sådan finns), men kondensering är speciellt karakteristisk för LT-turbiner. Kemisk (miljöbetingad) belastning koncentreras även därför till LT-turbinen, liksom erosionseffekten av kondensvattendroppar.

Ångexpansionen genom turbinsystemet medför att skovlarna är längst mot LT-turbinens utloppsända. Stora skovlar ger ofta upphov till höga centrifugalkrafter och en tendens för vibrationer som ytterligare kan öka till följd av vattendropparrelaterad erosion på LT-skovlarna. För att minimera vibrationerna binds skovlarna ofta ihop med en dämptråd genom varje skovel på samma steg. Korrosionsutmattnings till följd av mekanisk belastning är trots det inte en ovanlig brottmekanism när det gäller skovelsbrott.

Kondensatets kemiska inverkan beror på ångans kemi och föroreningarna i ångan. I synnerhet föroreningar som klorider, som under sura (endast delvis passiverande) förhållanden främjar gropfrätning, kan innehålla en mängd faktorer som initierar ytterligare brott och spricktillväxt utgående från gropfrätningen genom spänningskorrosion och korrosionsutmattnings. Dessa är även de främsta mekanismerna bakom sprickor och brott på skovlar i synnerhet då det gäller LT-skovlar. Effekterna av ångkemin har utretts utförligt i Värmeforskrapport 595.

#### *Material*

Material för skovlar och ledskenor i turbiner väljs med avseende på sin aktuella driftomgivning. Särskilt i den heta ändan av HT/MT-turbiner måste materialen ha hög tålighet mot krypdeformationer, krypsprickor, utmattnings, termisk åldring och försprödning.

I LT-turbinmaterial måste materialet vara tåligt mot den korroderande och eroderande effekten av våt ånga. Därför används normalt martensitiska stålsorter med 12-13 % Cr. För skovlarna på sista raden i en LT-turbin har även titan använts, men det har dock hittills varit ovanligt på grund av det relativt höga priset.

I Tabellerna 2.3.1-9 och 2.3.1-10 presenteras typiska skovelmateriel och deras egenskaper. Förteckningen är inte fullständig, men visar de material som oftast används i turbiner i dag.

Tabell 2.3.1-9. Viktiga egenskaper hos skovelmateriel (DIN 17440/17243/17240, SEW 400).

| Material          | Rp0,2<br>Mpa | Rm<br>MPa | A5 (L/T)<br>% | Seghet<br>J (ISO-V) | Turbin-<br>sektion |
|-------------------|--------------|-----------|---------------|---------------------|--------------------|
| 21 CrMoV 5 7      | 550          | 700-850   | 16            | 63                  | HT/MT              |
| X20 CrMoV 12<br>1 | 500          | 700-850   | 16/14         | 39/27               | HT/MT              |
| X22 CrMoV 12<br>1 | 600          | 800-950   | 14            | 27                  | HT/MT              |
| X 20 Cr 13        | 550          | 750-950   | 13/10         | -                   | LT                 |
| X 20 CrMo 13      | 550          | 750-900   | 14/10         | 28                  | LT                 |

Tabell 2.3.1-10. Sammansättning (vikt-%) av skovelmateriel (DIN 17440/17243/17240, SEW 400).

| Material           | C             | Si            | Mn            | Cr            | Mo            | V             | Sektion |
|--------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------|
| 21 CrMoV 5 7       | 0,17-<br>0,25 | 0,15-<br>0,35 | 0,35-<br>0,85 | 1,2-1,5       | 0,65-<br>0,80 | 0,25-<br>0,35 | HT/MT   |
| X 20 CrMoV 12<br>1 | 0,17-<br>0,23 | 0,4<br>max.   | 1,0<br>max.   | 10,0-<br>12,5 | 0,8-1,2       | 0,25-<br>0,35 | HT/MT   |
| X 22 CrMoV 12<br>1 | 0,18-<br>0,24 | 0,10-<br>0,50 | 0,30-<br>0,80 | 11,0-<br>12,5 | 0,8-1,2       | 0,25-<br>0,35 | HT/MT   |
| X 20 Cr 13         | 0,17-<br>0,22 | 1,0<br>max.   | 1,0<br>max.   | 12,0-<br>14,0 | -             | -             | LT      |
| X 20 CrMo 13       | 0,17-<br>0,22 | 1,0<br>max.   | 1,0<br>max.   | 12,0-<br>14,0 | 0,9-1,3       | -             | LT      |

#### 2.3.1.4.1 Skador i skovelsystem

Alla skovlar, inklusive de som drivs på områden utsatta för krypning, är konstruerade för att hålla en lång tid utöver turbinens konstruktionslivslängd. Dessvärre har det dock i praktiken visat sig att alla typer av åldrande skovlar tenderar att skadas under drift. Skovelsbrott är till både antal och kostnader den viktigaste typen av skador i ångturbiner, se Figur 2.3.1-4. EPRIs (USA) statistik över skovelsbrott visar att LT-skovlar och ledskenor är mest utsatta för skador (74 %), medan HT-sektionen (14 %) och MT-sektionen (12 %) står för den återstående andelen nästan till lika delar. Skovelsystemets skademekanismer är listade i Tabell 2.3.1-11. De skademekanismer som nämns i tabellen och i den fortsatta texten nedan finns närmare beskrivna i kapitel 1.5.

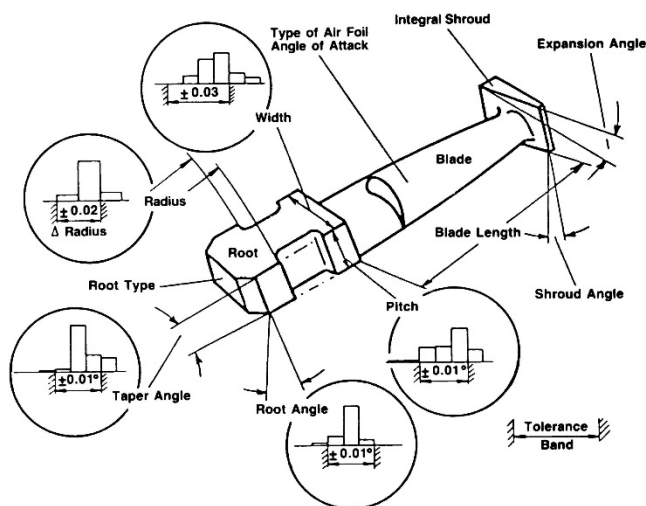
Medan cyklisk utmattningsbelastning kan påverka skovlarna i vilken sektion som helst i turbinen är endast de första stegen av skovlar i inloppsändan i HT- och MT-sektionerna utsatta för krypning. De kryppåkända skovlarna får inte deformeras så mycket att de vidrör turbinhuset eller förorsakar brott genom krypsprickbildning (Figur 2.3.1-13). Ledskenorna och skovlarna på första raden närmast ånginloppet påverkas också av partikelerosion på grund av oxiderna som transporteras av ångan med hög hastighet från det föregående ångsystemet. Denna erosion kan minska turbinens verkningsgrad genom att den ger upphov till ojämnheter på ledskenornas och skovlarnas ytor samt även ge små intrycksskador som initierar utmattnings- eller

kryputmattningsrelaterade sprickor. Slagbrott har ibland även observerats på föremål av metall (eller annat fast material) som förorsakats av yttre eller inre lösa föremål (FOD/DOD) i skovelsystemet.

Tabell 2.3.1-11. De viktigaste grupperna av skademekanismer för skovlar i ångturbiner.

| Mekanism                         | Plats                          | Observation genom      | Gränser                                            |
|----------------------------------|--------------------------------|------------------------|----------------------------------------------------|
| Krypning/deformation             | HT/MT                          | Dimensioner, kontakt   | 1 % eller prover                                   |
| Utmattning                       | Var som helst i skovelsystemet | OFP, brottanalys       | Ikke tillåten                                      |
| Korrosionsutmattning             | LT (MT)                        | OFP, skadeanalys       | Ikke tillåten.                                     |
| Spänningskorrosion, gropfrätning | LT                             | OFP, brottanalys       | Spänningskorrosionssprickning (SCC): ikke tillåten |
| Erosionskorrosion och nötning    | Inlopp, våt LT, skovelspetsar  | Dimensioner, OFP       | Som specificerat                                   |
| Sprickbildning, sprickor         | Fäste, skovel                  | OFP, brottanalys       | Ikke tillåten                                      |
| Mjuknande, hårdnande             | Alla / heta änden              | Hårdhet, replikprov    | Indirekt specificerad                              |
| Försprödning                     | Alla / heta änden              | Slag-/brottseghetsprov | Materialprover <sup>1)</sup>                       |

<sup>1)</sup> gäller nya material

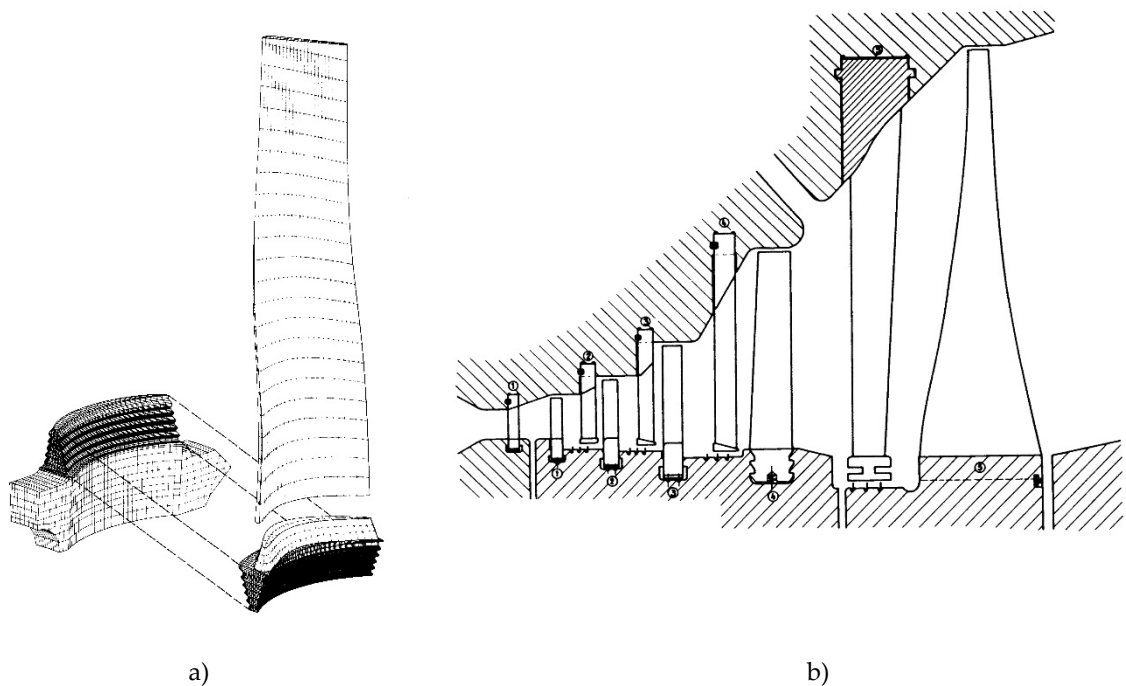


Figur 2.3.1-13. Toleranser för dimensions- och formmätning för turbinskovlar.

Figure 2.3.1-13 Tolerances of dimensional and shape measurements for a turbine blade.

I LT-turbiner (Figur 2.3.1-14) och även i viss omfattning i ändsektionerna i MT-turbiner uppkommer vattendroppar som växer och vidrör turbinytorna. De bildar därigenom

avlagringar och en lokalt anrikad korrosiv omgivning uppstår. I synnerhet när det är fråga om känsliga material med stor hållfasthet kan en anrikning av föroreningar till följd av upprepad ångkondensering föranleda sprickbildning till följd av spänningskorrosion och korrosionsutmattning. Anrikningsmekanismen som uppkommer vid upprepad kondensering och förångning kan leda till att en tillräcklig mängd föroreningar uppkommer som är oberoende av ångans renhet. I praktiken kan risken emellertid reduceras genom att korrekt ångkemi upprätthålls samt ett lågt pH-värde och en hög halt av föroreningar undviks. Skovelmateriel som har mycket hög sträckgräns (över 900 MPa) är utsatta för en risk för spänningskorrosion. Erosionskorrosion av inloppskanterna genom vattendroppar på skovlarna i det sista steget i LT-turbiner kan också vara ett problem. För att fördröja denna erosion är inloppskanterna i normala fall antingen härdade (t.ex. genom induktionshärdning) eller beklädda med ett erosionsbeständigt skikt. Dämputrustning (snedstöttor dämptrådar etc.) kan vara till hjälp för att hålla skovelvibrationerna i schack, men fästen och hål till dessa är även potentiella platser för spänningskoncentration och korrosion och kan, om de är fel placerade, ge upphov till sprickbildning. Även rörelser i infästningen av LT-skovlar kan uppstå vid baxning och ge upphov till nötning.



**Figur 2.3.1-14. a) En modell för bedömning av spänningar i skoveln; b) skovelarrangemanget i en LT-turbin**  
**Figure 2.3.1-14. a) A model for assessment of blade stresses; b) an arrangement of LP turbine blading.**

#### 2.3.1.4.2 Provning av skovelsystem

Eftersom det med tanke på tillförlitlig drift hos en ångturbin är viktigt att skovelsystemet fungerar med minsta möjliga risk för oväntade skador (se Figur 2.3.1-4) är skovelsystemet det viktigaste föremålet för återkommande inspektioner i turbiner.

Vibrationsmätning under drift kan ge indikationer på konditionen i skovelsystemet eller åtminstone på skador, även om problem i små skovlar eller ledskenor inte nödvändigtvis syns som så stora avvikelser att de kan bli upptäckta.

De flesta skovelinspektionerna sker med hjälp av oförstörande provning. De mest allmänna metoderna inom denna grupp är visuell provning och endoskopstödd (boroskopstödd) visuell provning. Dessa inspektioner kan göras utan att turbinhuset behöver öppnas i den utsträckning inspektionsöppningar och den inre geometrin tillåter.

Mer detaljerad oförstörande provning är vanligtvis möjlig endast efter att turbinhuset öppnats. Utöver ytinspektioner med magnetpulverprovning (MT) och penetrantprovning kan även virvelströmsprovning (ET) användas i syfte att söka sprickor på skovlarna. Ledskenor är i regel mindre åtkomliga än skovlar vilket kan innebära att möjligheterna till oförstörande provning blir mer begränsade. Vid större revisioner tillgrips ibland rotorlyft och inspektion av skovlar på verkstad.

#### 2.3.1.4.3 Återstående livslängd hos skovelsystem

Eftersom skovlarnas grundläggande konstruktion är tillräcklig för en livslängd som överstiger hela turbinens livslängd, består allvarliga hot mot en förväntad lång livslängd av avvikelser i driftförhållanden och design. När det gäller att förlänga eller trygga livslängden för nästa driftperiod är det vanligtvis tillräckligt att:

- bibehålla eller återställa de korrekta nivåerna för statisk och cyklisk driftbelastning; detta kan innebära reparationer och modifieringar i synnerhet för att kontrollera vibrationerna och de nominella frekvenserna i skovlarna;
- bibehålla eller återställa den specificerade driftomgivningen såsom ångkemi; detta är av största betydelse för att undvika avlagringar, gropfrätning, erosionskorrosion, spänningskorrosion och sprickbildning på grund av korrosionsutmattning i skovlarna i LT-turbiner (och i mindre utsträckning även MT-turbiner);
- bibehålla eller återställa komponentgeometrin och integriteten på en godtagbar nivå (i fråga om sprickbildning, erosion, erosionskorrosion, böjning och spel) i syfte att trygga säker drift åtminstone under nästa driftperiod; detta kan innebära reparation eller utbyte av skovlar med sprickor eller andra allvarliga skador.

Därför analyseras livslängden av enstaka skovlar och ledskenor i de flesta fall inte i detalj av tillverkaren med undantag för konstruktionsfasen. Ett undantag till denna regel är de relativt sällsynta fallen när man misstänker konstruktionsfel. Då kan tillverkare tillhandahålla ytterligare analyser. I fråga om skovlar och ledskenor vid inloppsändan i HT/MT-turbiner utsträcker sig dessa analyser till krypning

#### 2.3.1.5 Start/stopp- och reglerventiler

##### *Allmänna egenskaper*

Start/stopp- och reglerventilernas funktion beror på turbinens driftsätt. Är det fråga om drift med glidande tryck hålls huvudventilerna för det mesta helt öppna så att tryck, temperatur och flöde bestäms enligt mängden av ånga som turbinen behöver för att producera en viss effekt. Vid konstant tryck reglerar ventilerna mängden ånga som flödar in i turbinen för att producera den effekt som behövs. Ventilsystemet kan innefatta förbiledning för uppstartningsprocessen så att ångan, som i början av uppstartningen ofta innehåller vattendroppar och/eller fasta partiklar, kan avledas tills

den uppnått den ångkvalitet som behövs och därmed kan ledas in i turbinen. Stoppventilen används för snabb- och nödavställning i syfte att skydda turbinens integritet från systemstörningar eller eskalerande följder av dessa.

Ventilbelastningen varierar från statiska laster vid konstant drift till varierande laster och topplaster till följd av förändringar i temperatur och tryck under uppstartning, avställning eller andra belastningstransienter. Snabba förändringar i temperatur och belastning ger upphov till termisk utmattning och lågcykelutmattning (LCF) i olika delar av ventilhuset. Under drift är olika delar av ventilen, såsom de inre ytorna av ventilhuset, spindlar, säten och dessas kontaktytor, exponerade för erosion och kontaktnötning.

#### *Ventilmaterial*

För ventilhus används normalt samma typer av material som presenteras i Tabellerna 2.3.1-6 och 2.3.1-7 för turbinhus och när det gäller smidda sektioner, samma material som i ångledning, se **avsnitt 2.2.1**.

Ventilspindlarna och axlarna är ofta gjorda av vanliga seghärdade och härdade låglegerade stål eller av mera höglegerade värmeresistenta stålsorter (HT/MT-turbiner). Spindel- och sätesytorna är ofta tillverkade av eller åtminstone beklädda med nötningsbeständig hårdmetall, stellite eller andra legeringar. Stellite är koboltbaserade legeringar som kan svetsas eller termiskt sprutas på ventilens nötningsyta.

##### 2.3.1.5.1 Skador i start/stopp- reglerventiler

Skador på ventilhus sker främst genom lågcykelutmattning (LCF) eller genom kombinerad krypning och LCF. Skador till följd av erosion eller termisk chock kan också uppträda. Sprickbildning uppkommer huvudsakligen i regioner med spänningskoncentrationer och stora temperaturvariationer.

Ventilspindlar och säten är utsatta för erosionsnötning vid ångflöden med hög hastighet, då ångan transporterar fasta partiklar eller vattendroppar. Detta leder till materialförluster och som en följd av detta till ökad belastning av spindeln. Försprödning av spindelmaterialen kan även förekomma, vilket leder till sprödbrott.

Även ventilytorna är utsatta för skador genom lokal korrosion och erosion som leder till glapp och läckage. I vissa fall, i synnerhet i fråga om ventiler som hållits stängda över längre tidsperioder under drift, kan ventilspindeln och sätesytorna löpa risk för fretting. Denna skademekanism innebär adhesiv nötning på kontaktytorna som gör ytan grov och ökar risken för läckage i ventilen.

Bortsett från sprickbildning och sprickor i ventilhusen och spindlarna kan även andra skadetyper påverka ångflödet i ventilen. Förändringar i flödesegenskaperna kan ytterligare öka erosionen och nötningen.

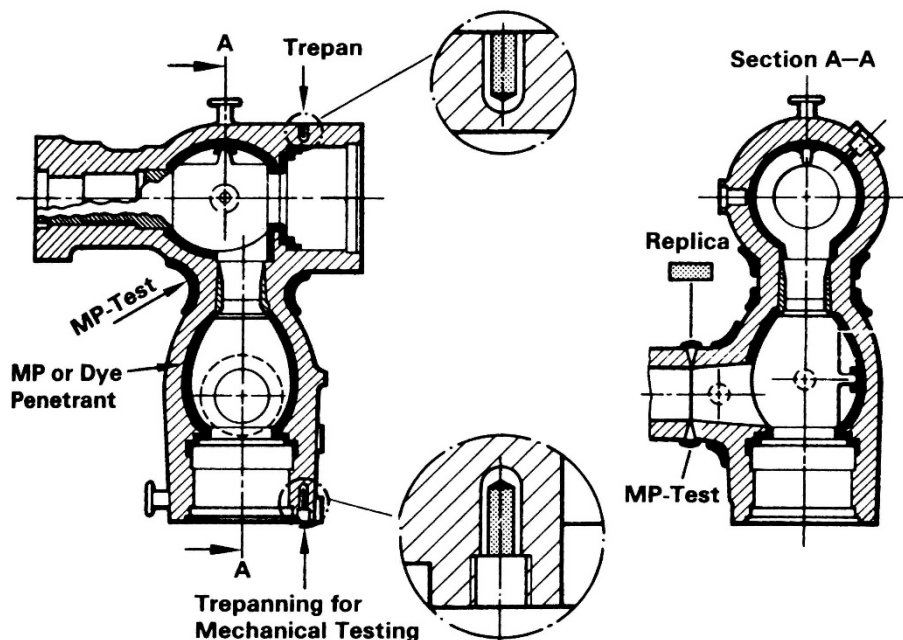
##### 2.3.1.5.2 Provning av i start/stopp- reglerventiler

Provning av ventilhus görs vanligen med oförstörande provningsmetoder (Figur 2.3.1-15) Ibland görs kompletteringar med begränsad mekanisk provning. Den oförstörande provningen innebär främst ytprovning med hjälp av magnetpulverprovning och penetrantprovning som fokuserar på spänningskoncentrationer och höga spänningar. Eftersom HT-ventiler vanligtvis är belägna i kryputsatta områden bör bultarna till flänsfogarna inspekteras, på motsvarande sätt som andra HT-turbinbultar (se **avsnitt**

**2.3.1.6.2** om provning av bultar). HT-ventiler ventiler kan även behöva undersökas med replikprov som komplement till magnetpulver- eller penetrantprovningen. Ifall en sprickindikation föreligger kan ultraljudprovning (se avsnitten om provning av turbinhus, rotor och skivor i detta kapitel) användas för att bestämma sprickstorleken.

Spindlar, säten och axlar provas vanligen visuellt och med mekaniska mätningar med avseende på nötning. Med avseende på sprickavsökning används magnetpulver- eller penetrantprovning.

Försprödning av spindelmaterial kan endast provas genom förstörande provning, vilket kräver provuttag av spindlarna. Alternativt kan skadestatistik användas för att bedöma säkra driftperioder. Detta kräver dock att data samlas in om jämförbara spindlar.



Figur 2.3.1-15. Stopp- och reglerventil: typiska ställen för provning (inre delarna syns inte).

Figure 2.3.1-15. Stop and control valve: typical sites of testing (internals not shown).

#### 2.3.1.5.3 Återstående livslängd hos start/stopp- reglerventiler

Livslängden för ett ventilhus kan bedömas med hjälp av uppmätta drifttemperaturer och andra driftdata i förening med konstruktionsdata som stöd för analysen. Vissa analytiska metoder kan användas, men eftersom de dominerande spänningarna och deformationerna i ventilhusen tenderar att uppkomma på grund av transienter under uppstartning och avställning, under vilka temperaturerna och därför också materialegenskaperna ändras, kräver en omfattande behandling en numerisk spänningsanalys. För den återstående delen av livslängdsbedömningen följs i stor utsträckning europanormerna (EN 12952, EN 13445 och EN 13480) och de äldre tyska standarderna av serierna TRD 300 och 500, eller interna procedurer inom företaget i fråga som oftast i stort sett motsvarar de tyska standarderna. Standardmetoderna är



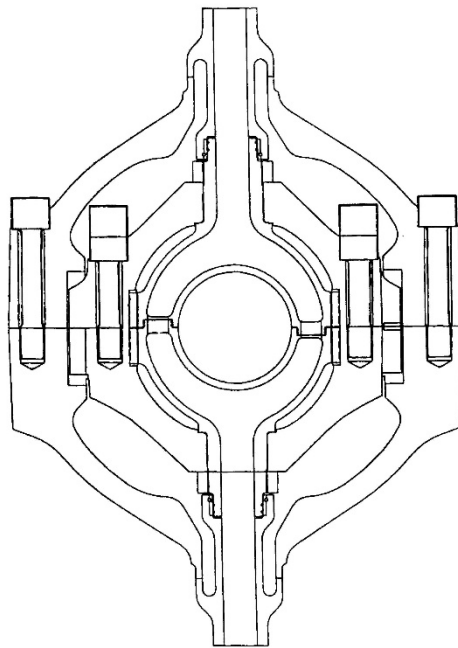
konstruerade för nominellt felfria material. Ifall betydande fel uppträder som föranleder reparation kan ytterligare brottmekaniska analyser behövas.

Att förlänga livslängden hos ventiler eller ventildelar kräver oftast endast enklare reparationer av nötta ytor på spindlar, säten och ventilaxlar. Reparationerna kan utföras med hjälp av värmebehandling i syfte att återställa duktiliteten, ytbeläggning genom svetsning eller termisk sprutning, samt maskinell bearbetning till korrekta dimensioner. Reparation är ofta ett ekonomiskt alternativ till att anskaffa nya ventildelar.

#### 2.3.1.6 Turbinbultar

##### *Allmänna egenskaper*

Belastningen av en turbinbult under drift beror mycket på var bulten sitter i turbinen. De bultar som utsätts för den största belastningen håller ihop huvuddelningsplanet i den hetaste delarna av HT/MT-sektioner (kryputsatta områden, över 450 °C). Figur 2.3.1-16 visar exempel på bultning i en HT-turbin.



**Figur 2.3.1-16. Flänsbultar i inre och yttre turbinhus i en HT-turbin**

**Figure 2.3.1-16. Flange bolts of inner and outer casings of a HP turbine.**

Bultar byts i allmänhet ut efter att sprickbildning eller mer än 1 % permanent deformation observerats. Tillverkarna rekommenderar vanligtvis fullständigt eller omfattande utbyte av bultarna om någon avvikelse påträffas i endast en bult, men detta kan vara ett mycket konservativt förfarande och kostnader för en hel bultsats är långt ifrån försumbar (typiskt ca 0,6–1,3 miljoner SEK). Då man beaktar att bultarna är konstruerade för samma livslängd som turbinen och att de inte utsätts för samma faktiska belastning, lönar det sig i allmänhet att bedöma bultarnas faktiska kondition mer detaljerat.

I dagens turbiner är de flesta bultar konstruerade så att det tyngst belastade området befinner sig inom den släta delen i bultens mitt, där diametern ofta är ca 0,8 gånger diametern vid gängroten. Konstruktionen syftar till att undvika uppkomst av sprickor på bultens gängor.

#### *Bultmaterial*

Bultmaterial enligt DIN 17240 presenteras i Tabellerna 2.3.1-12 och 2.3.1-13.

Förteckningen är inte fullständig, men den visar de som är allmänt använda. Mot slutet av 1970-talet har de låglegerade stålsorterna 21CrMoV511 och 24CrMoV55 bytts ut mot 21CrMoV57. Standarden omfattar även relaxationsegenskaper upp till 30 000 h.

**Tabell 2.3.1-12. Viktiga mekaniska egenskaper för bultmaterial i turbiner enligt DIN 17240.**

| Material        | Rp0,2<br>MPa | Rm<br>MPa | A5<br>% | Z<br>% | Seghet<br>J (ISO-V) | Max.<br>temp. °C |
|-----------------|--------------|-----------|---------|--------|---------------------|------------------|
| 24CrMo5         | 440          | 600-750   | 18      | 60     | 118                 | 400              |
| 21CrMoV57       | 550          | 700-850   | 16      | 60     | 63                  | 540              |
| 40CrMoV47       | 700          | 850-1000  | 14      | 45     | 47                  | 540              |
| X22CrMoV121     | 700          | 900-1050  | 11      | 35     | 20                  | 580              |
| X19CrMoVNbN111  | 780          | 900-1050  | 10      | 40     | 20                  | 580              |
| X8CrNiMoBNb1616 | 500          | 650-850   | 16      | 40     | 47                  | 650              |
| NiCr20TiAl      | 600          | ≥1000     | 12      | 12     | 20                  | 700              |

**Tabell 2.3.1-13. Nominell sammansättning (vikt-%) av bultmaterial i turbiner enligt DIN 17240.**

| Material        | C    | Cr   | Mo  | Ni   | V   | Övriga             |
|-----------------|------|------|-----|------|-----|--------------------|
| 24CrMo5         | 0,24 | 1,1  | 0,3 |      |     |                    |
| 21CrMoV57       | 0,21 | 1,3  | 0,7 |      | 0,3 |                    |
| 40CrMoV47       | 0,40 | 1,1  | 0,7 |      | 0,3 |                    |
| X22CrMoV121     | 0,21 | 12   | 1,0 | 0,6  | 0,3 |                    |
| X19CrMoVNbN111  | 0,19 | 11   | 0,8 | 0,6  | 0,2 | Nb~0,5, N~0,1      |
| X8CrNiMoBNb1616 | 0,08 | 16,5 | 1,8 | 16,5 |     | Nb~1,25,<br>B~0,07 |
| NiCr20TiAl      |      | 20   |     | ≥ 65 |     | Al~1,5, Ti~2,4     |

#### 2.3.1.6.1 Skador i turbinbultar

Skador på turbinbultar kan ibland upptäckas under drift, men i mindre uppenbara fall endast under serviceavställning med demonterad turbin. Skademekanismer och några av deras viktigaste egenskaper presenteras i Tabell 2.3.1-16.

**Tabell 2.3.1-16. De viktigaste grupperna av skademekanismer för bultar i ångturbiner.**

| Mekanism              | Plats (i turbinen)    | Observation genom    | Gränser                        |
|-----------------------|-----------------------|----------------------|--------------------------------|
| Permanent deformation | Sidorna, inloppsändan | Dimensioner, läckage | Max. 1 % töjning <sup>1)</sup> |
| Sprickbildning, brott | Sidor + gängor        | OFP, läckage         | Inga tillåtna gränser          |
| Mjuknande, hårdnande  | Överallt              | Hårdhet, replikprov  | Relativt ursprunglig           |
| Försprödning          | Överallt              | Slagprov             | Se DIN 17240 <sup>2)</sup>     |

<sup>1)</sup> observera att hoptryckning ("negativ krypning") kan uppträda vid nickelbaserade legeringar som NiCr20TiAl

<sup>2)</sup> gäller nya bultar.

#### *Permanent deformation*

En permanent relaxationsdeformation är en av viktigaste storheterna vid bedömning av kondition och livslängd hos bultar. Töjningen påverkas av åtspänningsgrad och driftförhållanden, främst temperaturen, och är relativt lätt att mäta vid underhåll. Relaxationsdeformation utvecklas snabbare med ökande temperatur, föråtspänning och förkortade efteråtspänningsperioder. Deformationen är störst under den första driftcykeln. Systematiska skillnader i deformationen längs flänsen indikerar ojämn spänning (och temperatur), och töjningsavvikelser hos närbelägna bultar bör undersökas. Bultars livslängd kan bedömas genom att tiden fram till 1 % deformation förutsägs utgående ifrån mätningar. I normala fall överstiger dock den förväntade livslängden hos en bult turbinens avsedda livslängd.

#### *Sprickbildning och brott på bultar*

När en bult är deformerad till följd av krypning (kryprelaxation) är de typiska ställena för sprickbildning de gängor som först belastas hos bulten. Utmattning till följd av transienter under uppstartning och avställning kan också vara en bidragande orsak till sprickbildning. Ihåliga bultar kan uppvisa brott på inre sidan av borrhållet i centrum till följd av inkorrekt inre uppvärmning vid åtdragning av bultarna.

Bultbrott är sällsynta. I fall bultbrott uppträder omfördelar den trasiga bulten sin last så att den överförs till de närbelägna bultarna. Det är inte lätt att upptäcka bultbrottet förrän de återstående bultarna deformeras eller relaxerar tillräckligt för att åstadkomma läckage. Bultar skadas oftast under efteråtspänning eller under uppstartning eller avställning, eftersom den kritiska brottstorleken då är minst. I dessa fall är bultbrotten relativt lätta att upptäcka.

#### *Försprödning*

Materialförsprödning uppkommer vanligtvis genom att icke-önskvärda, orena element diffunderar till korngränserna under drift. I fall av försprödning av materialet kan sprickor uppkomma i bulten vid efteråtdragning eftersom den kritiska sprickstorleken då är liten i rumstemperatur. Vanligtvis upptäcks dock sådana sprickor vid oförstörande provning. Försprödning är ofta bakomliggande vid bultbrott under uppstart vid en tid då den mekaniska lasten är hög, men bultens temperatur fortfarande är ganska låg. Den kritiska brottstorleken kan i praktiken vara mycket liten under sådana förhållanden. Bultar med sprickor byts ut mot nya.

### Flänsläckage

Bultar byts ofta ut efter att flänsen börjat läcka, men det bör observeras att själva bultarna oftast inte är orsak till läckaget, utan orsaken kan vara förvriddning eller deformation av flänsarna, annanstans i skalet eller i bottenplattan, eller av ojämnheter i flänsytan. Det kan emellertid någon gång hända att ett bultbrott blir upptäckt vid uppstartning, vilket leder till att den närbelägna bulten överbelastas och ger upphov till läckage i flänsen. I ett sådant fall är bultbrottet entydigt orsaken till överbelastning och läckage. Dessutom kan en bristfällig åtspänning eller en omfattande relaxation i bulten, som antingen beror på låg materialhållfasthet eller lång drifttid vid hög temperatur, leda till att den nödvändiga åtspänningsgraden inte uppnås med läckage som följd.

#### 2.3.1.6.2 Provning av turbinbultar

Observationer av bultars prestanda och funktion under drift begränsas ofta till relativt allvarliga fall där t.ex. bultbrott förorsakar ångläckage, och detta kan innebära brott på mer än en av de närliggande bultarna. I vanliga fall kan bultars kondition och livslängd endast bedömas utgående från åtminstone delvis demonterade turbinbultar.

De vanligaste provningsmetoderna är oförstörande, normalt omfattande visuell provning, mätning av dimensioner och ytinspektion med hjälp av magnetpulverprovning och penetrantprovning och/eller virvelströmsprovning.

Ifall ett tillverkningsfel misstänks som hänför sig t.ex. till värmebehandling eller fel material, kan detta undersökas med hårdetsprovning och replikprovning in situ. Den ungefärliga kemiska sammansättningen kan också uppmätas med hjälp av bärbar utrustning för kemisk analys.

Vid måttinspektion mäts bultarnas längd och diameter (för att upptäcka permanent deformation) med hjälp av konventionella mekaniska redskap, eller med ultraljudsprovning där det är möjligt. Bultarnas åtspänningsgrad kan även bedömas antingen mekaniskt eller genom ultraljudsprovning, när bulthopsättningen medger sådan provning. Åtspänningsmomentet ger inte tillförlitlig information om åtspänningsgraden. Metoder som rekommenderas i dag är grundade på mekanisk längdmätning före och efter åtspänning.

Den mätlängd som deformationsmätningen utförs på ska anpassas så att den motsvarar den faktiska deformationslängden, som inte nödvändigtvis är exakt samma som det släta området på bulten. Lokala deformationer kan bland annat bero på ojämna temperaturfördelning längs bulten. Ett alternativ som avviker från standardpraxis är att mäta deformationen diametriskt, vilket kan visa den lokala deformationen inom det hetaste området av bulten. Man bör då dock beakta att diametern i gamla HT/MT-bultar kan uppvisa en viss variation i diametern på grund av normal ytoxidering.

#### 2.3.1.6.3 Återstående livslängd hos turbinbultar

Livslängden hos turbinbultar förkortas av:

- *Bristfälliga materialegenskaper*; speciellt låga värden av sträckgräns, kryprelaxationshållfasthet och krypduktilitet vid drifttemperatur, eller låg materialseghet i rumstemperatur.
- *Konstruktionsfel*; består normalt av höga spänningskoncentrationer som leder till uppkomst av sprickor på grund av vassa hörn.

- *Överbelastning*; för stark åtdragning leder till för stor töjning eller för hög töjningshastighet vid relaxationer. För att undvika en för stor åtdragning är det nödvändigt med kontrollerade procedurer för efteråttdragning och mätning av töjningen.
- *Långfristig drift efter efteråtspänning*; många faktorer kan inverka på bultens livslängd under drift.

Genom noggrann provning och dokumentation av resultaten kan onödigt utbyte av bultar ofta undvikas. Följande förutsättningar eller indikationer behöver inte nödvändigtvis rendera i ett utbyte av turbinhusbultarna:

- *Läckage vid flänsen*; läckaget kan i själva verket bero på ojämnheter eller förvridning av turbinhuset till följd av termiska transienter i stället för på problem i själva bultarna.
- *Hög ålder*; såsom i fråga om andra turbinkomponenter är ålder i sig ingen orsak till att byta ut komponenten i fråga. Det finns fall där turbinen har 200 000 drifttimmar utan att bultar bytts ut, trots att utbyte av bultar rekommenderats efter 50 000–70 000 h.
- *Förstörande mekanisk provning av enskilda bultar*; detta görs i vanliga fall för att bedöma segheten med avseende på eventuell försprödning. Resultaten är dock inte nödvändigtvis representativa eller korrekt tolkade vad gäller risken för bultbrott.
- *Antal efteråttdragningar*; antalet efteråttdragningar står inte i någon unik relation till bultens livslängd, utan snarare till den töjning som uppkommer. Den normala töjningen vid en efteråttdragning är 0,12–0,15 % (max. 0,2 %). Eftersom relaxationen är snabbast under den första driftperioden är det möjligt att tillämpa ett något lägre värde för denna töjning för de därpå följande perioderna då den ackumulerade töjningen beräknas.

Bedömningen av bultars livslängd kan sammanfattas i de tre följande kriterierna för utbyte av bultar:

- Den bedömda permanenta töjningen är minst 1 %.
- Den permanenta töjningen bedöms överskrida 1 % under nästa driftperiod.
- Sprickor eller andra betydande mekaniska skador har upptäckts på bulten.
- 

Om dessa kriterier inte uppfylls, kan bultarna anses vara i tillfredsställande skick för drift.

## REFERENSER

- Diaz-Tous I. A. (ed). 1988. Steam Turbines for Power Generation. ASME, New York. 231 p.
- Marlow B. A. 2000. The evolution of the modern large reheat steam turbine - a UK view. Proceedings of the 5th International Charles Parsons Turbine Conference, 3-7 July, Cambridge. p. 40-57.
- Rotvel F., Pedersen L. B., Luotonen J. & Auerkari, P. 1995. Life extension of a steam turbine. Proceedings of the Baltica III International Conference on plant condition and life management, vol 1. VTT, Espoo, p. 165-178.
- Shlyakhin P. 1988. Steam turbines (in Indonesian). Penerbit Erlangga, Jakarta. 326 p.
- Strang A. (ed.). 1995. Performance of bolting materials in high temperature plant applications. The Institute of Materials, London. 436 p.
- Tavast J. 1996. Korrosionsutmattning i ångturbinskovlar - Erfarenheter, inverkande faktorer och möjliga åtgärder. Värmeforskrappport nr 595.
- Toppila J. & Pietikäinen P. 1991. Guidelines to life of steam turbines (in Finnish). Association for Energy Economy, Helsinki. 99 p+app.
- Wellinger K., Gimmel P. & Bodenstein M. 1972. Werkstoff-Tabellen der Metalle. Alfred Kröner Verlag, Stuttgart. 912 S.
- Wrangensten L. 1995. Livslängdsanalys av ångturbiner samt generell beskrivning av livslängdsområdet. Värmeforskrappport nr 554.

## 2.3.2 Gasturbiner

### 2.3.2.1 Allmänt om gasturbiner och livslängdsarbete med dessa

#### *Gasturbin – definitioner och utveckling*

En gasturbin är en roterande maskin där en del av turbinens effekt används för att driva förbränningsluftens kompressor. Bränslet använder vid förbränningen denna luft i en trycksatt förbränningsdel, från vilken heta förbränningsgaser leds in i turbinsektionen för att expandera.

Speciellt i det fall att det finns en separat rotoraxel med en turbinsektor som driver enbart kompressorn kallas denna sektion gasgenerator, medan den övriga turbinen med sin egen rotor fungerar som kraftkälla för att utvinna kraft för yttre drift. Stora gasturbiner är dock vanligtvis konstruerade med en enkel rotoraxel, varvid dessa två funktioner i turbinen inte är strukturellt separerade.

Vissa milstolpar i gasturbinernas utvecklingshistoria presenteras i Tabell 2.3.2-1.

**Tabell 2.3.2-1. Milstolpar inom utvecklingen av gasturbiner (Bathie 1996)**

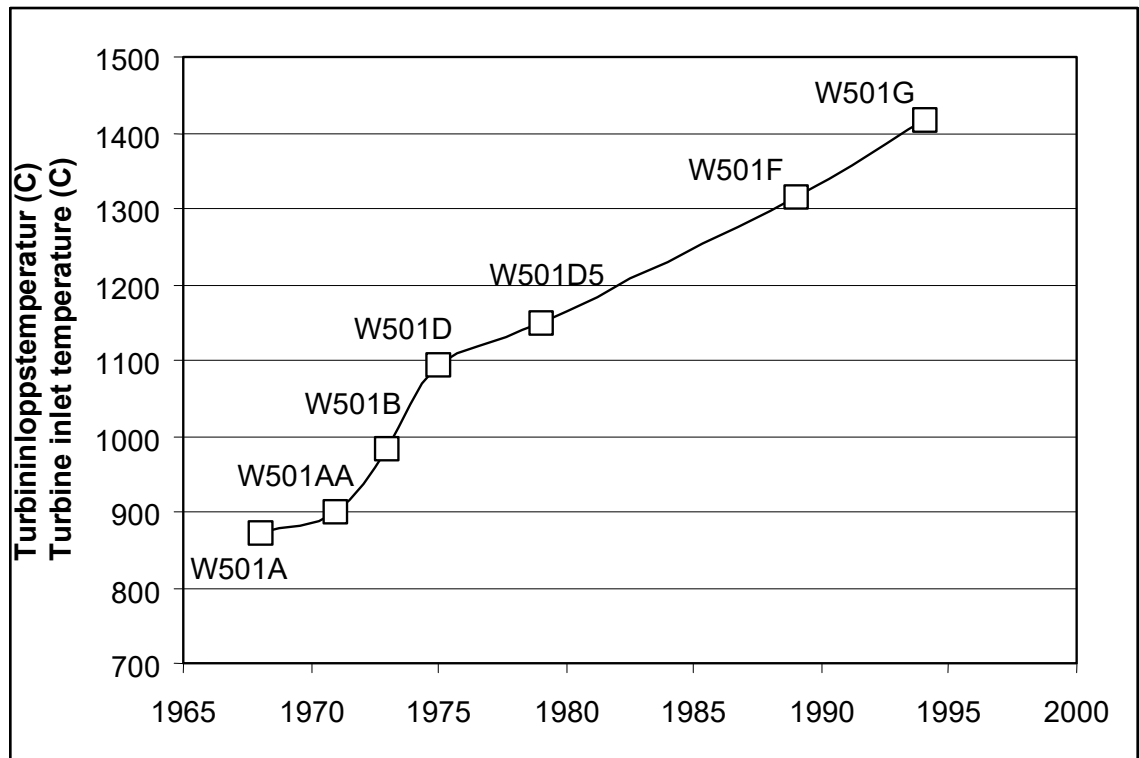
| Första:                   | Utvecklad av      | Årtal | Anmärkningar                                           |
|---------------------------|-------------------|-------|--------------------------------------------------------|
| Gasturbinpatent           | J. Barber (UK)    | 1791  | Maskinen byggdes troligtvis aldrig                     |
| Testade gasturbin         | Stolze (F)        | 1900  | Verkningsgrad kring noll                               |
| Gasturbin i drift         | H. Holzwarth (D)  | 1927  | 500 kW, för förbränningsluft i panna                   |
| Flygjetmotor              | H. v. Ohain (D)   | 1939  | Heinkel S-3b i ett He-178-flygplan                     |
| Gasturbindrivna kraftverk | Brown Boveri (CH) | 1940  | 4 MWe reservanläggning med enkel process <sup>1)</sup> |

<sup>1)</sup> eldningsolja, värmeeffekt 16-18 %, turbinens inloppstemperatur 530-575 °C

Allt sedan 1940-talet har utvecklingen gått framåt med stormsteg på en mycket bred front (Figur 2.3.2-1). Den termiska verkningsgraden kan i dag i konstruktioner som bygger på en enkel process överstiga 40 % och i konstruktioner som bygger på en kombinerad process överstiga 55-60 %. En stor del av utvecklingen i synnerhet av landbaserade gasturbiner är av relativt färskt datum och har varit snabb. Detta har fört med sig att teknologin inte är lika väl etablerad som till exempel i fråga om pannor eller ångturbiner.

Allt sedan gasturbinerna introducerades har det varit en betydande utmaning att kunna hålla deras nominella kapacitet och driftförhållanden konstanta under längre tidsperioder. Detta beror till stor del på kravet att turbinens inloppstemperaturer skall vara så höga som möjligt för att en konkurrenskraftig verkningsgrad skall kunna uppnås, vilket leder till slitage och nötning på materialen. Turbinens inloppstemperaturer är högre än 1400° C i vissa gasturbiner avsedda för kraftproduktion och över 1500° C i gasturbiner avsedda för flygplansmotorer. Detta kräver kostsamma materiallösningar trots effektiv kylning. Den huvudsakliga orsaken till att underhållsintervallen för gasturbiner tenderar att vara kortare än för andra huvudkomponenter i kraftverk är de direkta och indirekta konsekvenserna av de höga temperaturerna.





**Figur 2.3.2-1.** Inloppstemperaturens utveckling hos en W501 gasturbin (Bathie 1996; Farmer 1999). Tryckförhållandet har under samma period ökat från 7,5 till 19,2, den nominella kapaciteten från 45 till 253 MW och den termiska verkningsgraden från 27 till 38 % i en enkel process (elgenerator drift utan avgaspanna).

**Figure 2.3.2-1.** Evolution of the turbine inlet temperature of the W501 gas turbine (Bathie 1996; Farmer 1999). Over the same period, the pressure ratio has increased from 7.5 to 19.2, the power rating from 45 to 253 MW, and thermal efficiency from 27 to 38 % in simple cycle.

Kravet på tillförlitlighet har varit den drivande faktorn inom utvecklingen av flygplansmotorer, och detta har även tillfört kraftproduktionen teknologisk spetskompetens. Sedan 1988 har till exempel motorernas driftstopp under flygning enligt statistiken sjunkit under 0,02 per 1000 motortimmar för vissa motortyper (Bathie 1996). Ändamålsenligt underhåll har legat till grund för denna utveckling.

Kostnaden av en startinvestering per MWe kan vara blygsam, eftersom en relativt kompakt gasturbinenhet kan generera en stor effekt. Förhållandevis täta utbyten av komponenter kan dock betydligt höja underhålls- och livslängdskostnaderna. Med tanke på konkurrenskraftig drift är det av väsentlig betydelse att hantera livslängds- och underhållskostnader på lång sikt. Då dessa kostnader i stor utsträckning påverkas av komponenterna i de heta sektionerna kommer vi nedan att koncentrera oss på dessa sektioner i gasturbinen.

#### *Grundläggande gasturbinkonstruktioner*

De flesta gasturbiner avsedda för kraftgeneration har ursprungligen konstruerats antingen för detta ändamål eller som flygplansmotorer.

Gasturbiner kan indelas i olika typer på olika sätt, till exempel enligt flödesriktning i kompressorn och turbinsektionerna (axiell eller centrifugal/radiell), enligt ursprunglig

drifttyp eller enligt konstruktionsmässiga olikheter. Eftersom de största tillverkarna huvudsakligen tillverkar kompressorer och turbiner med axialflöde, behandlas endast de två sist nämnda typerna här.

Det första fallet omfattar alla stora landbaserade tunga gasturbiner, eftersom ett flygplans vikt eller kraftgränser är av underordnad betydelse här. De landbaserade gasturbinerna kan dock skilja sig från varandra beroende på om de är konstruerade för att täcka topplast eller baslast. Topplastanläggningar är vanligtvis mindre och konstruerade för att tåla korta uppstartningsperioder, medan den totala verkningsgraden är av något mindre vikt än tillförlitlighet i uppstartning och kraftleverans. Baslastanläggningar används ofta i kombikraftverk eller kraftvärmeverk (CHP), där gasturbinens termiska verkningsgrad och tillförlitlighet på längre sikt är av betydelse. De typiska värdena för termisk verkningsgrad är dock i dagens läge under 40 % för alla landbaserade tunga gasturbiner som används i en enkel process (elgenerator drift utan avgaspanna).

Gasturbiner som ursprungligen utvecklats för flygplansmotorer och sedan modifierats för landbaserad kraftproduktion är typer avledda från luftfartstekniken, så kallade aeroderivat. Dessa maskiner är i normala fall mindre än de tunga landbaserade gasturbinerna, men har en högre verkningsgrad, som bäst drygt 40 %. De är konstruerade för krävande, cyklisk drift, eftersom det är en viktig egenskap för flygplansmotorer. Dessa fördelar balanseras åtminstone delvis med nackdelarna av en mer komplex konstruktion, vanligtvis med två rotoraxlar (dvs. en separat gasgenerator), och högre specifika investeringskostnader.

Några av de mindre gasturbinerna som ursprungligen konstruerats för landbaserad drift kan ha vissa av aeroderivatens egenskaper, till exempel en rotor med två axlar. Detta syftar till att ge högre prestanda eller bättre vridmoment vid delbelastning för topplastdrift eller mekanisk drift.

Stora tillverkare av gasturbiner för kraftgeneration anlitar olika strukturella rotorkonstruktioner. En konstruktion grundar sig på rotor tillverkade av smidda delar som svetsats ihop, i stort sett i likhet med ångturbinrotorer av samma tillverkare. Andra konstruktioner grundar sig på hopsättning av separata skivor med en central bult eller med flera bultar som fäster skivorna vid varandra. Sättet på vilket vridmomentet distribueras mellan skivorna varierar likaså. En tillverkare använder tandade anslutningar, medan andra använder släta ytor och förlitar sig på att vridmomentet distribueras genom friktion.

Några huvudsakliga konstruktionsegenskaper hos individuella komponenter i heta områden behandlas i korthet nedan med avseende på förbränningssystem och skovlar.

#### *Faktorer som påverkar gasturbiners prestanda och livslängd*

En gasturbins effekt kan variera upp till cirka 30 % beroende på temperaturen vid kompressorinloppet, i synnerhet på breddgrader där vinter- och sommartemperaturerna skiljer sig mycket från varandra (stort respektive litet kapacitetbehov). Gasturbiner är relativt ineffektiva vid delbelastning och därför drivs de helst så nära den nominella effekten som möjligt. När det gäller förluster som kan påverkas av operatören så minskar kompressorns aerodynamiska prestanda och därmed gasturbinens verkningsgrad med flera procent på grund av nedsmutsning av kompressorn till följd av gradvis förorening från tilluften. Lämpliga luftfilter och

rengöring av kompressorn med rätt valda intervall är av väsentlig betydelse för att gasturbinens prestanda skall bibehållas.

Med avseende på livslängdshantering är dock andra faktorer viktiga. Dessa kan grupperas i:

- Faktorer relaterade till konstruktion, tillverkning, hopsättning, reparationer och uppgradering.
- Faktorer relaterade till skillnader mellan de aktuella driftförhållandena och planerad drift.
- Faktorer relaterade till livslängdsstyrning, konditionsövervakning och inspektion.

I fråga om den första gruppen har alla gasturbiner och deras kritiska komponenter, såsom rotor, kompressorer och komponenter i heta områden konstruerats för en viss begränsad livslängd. Denna konstruktionslivslängd kanske inte är känd, eller åtminstone inte publicerad av kommersiella orsaker, men den tekniska livslängden har en sannolik gräns. Den faktiska livslängden är givetvis i hög grad beroende av komponenternas tillverkning, hopsättning, underhållsåtgärder och även uppgradering. Av denna orsak kan den ursprungliga nominella livslängden inte vara väldigt noggrann, men genom upprepade iterationer kan den preciseras bättre.

De faktiska driftförhållandena avviker vanligtvis åtminstone i någon mån från de förväntade förhållandena, och detta är den andra huvudorsaken till att den nominella livslängden inte är exakt. De huvudsakliga faktorerna i detta fall är de faktiska drifttemperaturerna och deras växlingar, cyklisk belastning samt omgivningen.

Övervakning och kontroller är viktiga i syfte att säkerställa att de planerade driftparametrarna iakttas och att betydande avvikelser upptäcks och åtgärdas. Även om rutinerna för kontroller av gasturbiner i drift, fortlöpande övervakning och diagnostik förbättrats mycket på sista tiden, är övervakning eller inspektion av avställd maskin fortfarande nödvändigt. Stora underhållsbeslut om tajming och omfattning av reparationer eller utbyten av komponenter görs endast efter ändamålsenlig inspektion med anläggningen ur drift.

#### *Underhållsstrategier*

Ur ägarens synvinkel är de huvudsakliga tillgängliga underhållsstrategierna följande:

- Underhållet sköts av originaltillverkaren av maskinen (OEM).
- Underhållet sköts av ägaren/driforganisationen.
- Underhållet sköts av en tredje part (t.ex. ett underhållsföretag som inte är originaltillverkare).

Eftersom underhålls- och reservdelsverksamheten tenderar att vara attraktiv erbjuder originaltillverkarna utöver försäljning av nya maskiner gärna drift- och underhållstjänster, i likhet med övriga underhållsföretag som inte är originaltillverkare.

Valet mellan optionerna påverkas av ekonomiska faktorer såsom kostnader, den erbjudna tjänstens anseende och resurser för ändamålet. För stora kraftbolag kan det till exempel vara möjligt att anlita mer tjänster av icke-originaltillverkare än för små eller specialiserade industriföretag som kanske föredrar att fokusera på sin kärnverksamhet. I fråga om nya gasturbiner med gällande garanti överlämnas en stor del av underhållsfunktionerna ofta till originaltillverkaren.

Underhållet är ofta uppbyggt av flera av de ovan nämnda elementen och mixen kan variera med tiden, till exempel på grund av större tillgång på optioner för äldre turbinmodeller.

Med avseende på uppkomsten av underhållskostnader bör även många andra detaljer övervägas. Huvudmålet är, eventuellt med undantag för försäljning av reservdelar, att minimera den övergripande livslängdskostnaden. Denna livslängd bestäms i praktiken av komponenterna inom de heta områdena, som föranleder både de högsta kostnaderna och de kortaste återkommande reparationsintervallen eller utbyten.

### 2.3.2.2 Hantering av livslängd hos högtemperaturkomponenter

#### *Allmänt*

Vid underhåll av gasturbiner kräver beslut om reparation eller utbyte av högtemperatur-komponenter ofta snabba svar på bland annat följande frågor:

- Kan komponenten repareras? Vilken reparationsmetod är i så fall den bästa?
- Hur länge dröjer det tills nästa reparation är aktuell och vad är den totala återstående livslängden?
- På vilket sätt inverkar ändringar i anläggningens driftsätt på komponentens prestanda?

Syftet med varje större underhållsåtgärd är att rusta upp maskinen så att drift enligt planerat tidsschema uppnås. Detta innebär att de flesta komponenter borde vara "som nya" vid driftperiodens början. Vanligtvis tas komponenter ut ur maskinen och repareras före den teoretiskt optimala tidpunkten. Tillförlitlighet och säkerhet prioriteras på bekostnad av underhållskostnaderna. Å andra sidan kan oväntade haveri- och tillförlitlighetsproblem uppkomma hos komponenter inom heta områden när det är fråga om en turbinkonstruktion som ännu inte är fullt utvecklad, dvs. där det ännu inte är fullständigt verifierat att turbinen kan drivas och underhållas under flera större underhållscykler.

#### *Degradering av komponenter*

I syfte att optimera underhållsbesluten är det av största vikt att förstå:

- degraderingsförlopp och skademekanismer hos komponenterna,
- inverkan av maskinens driftsätt, och
- effekter av olika reparationstekniker

Bedömningar av den återstående underhållsperioden och/eller den totala livslängden borde om möjligt grundas på mätbara och kvantifierbara fysikaliska egenskaper.

Man bör dock beakta att alla ovan nämnda faktorer är olika för olika komponenter i heta områden och att de även varierar från en maskintyp till en annan. Dessutom uppvisar dessa faktorer viktiga förändringar även när obetydliga modifieringar i komponentspecifikationen införs under utvecklingen av motorkonstruktionen. De faktorer som begränsar underhållsintervallen måste därför bedömas skilt för sig för varje enskild komponent i heta områden med hänsyn till dess utvecklingsstadium eller version.

#### *Degraderingsförlopp*

Degradering hos komponenter i områden med höga temperaturer kan indelas i separata grundläggande grupper:

1. Miljörelaterad degradering av komponenten och dess ytbeläggningsskikt genom
  - att de skyddande oxidbildande elementen (Al, Cr) har utarmats från ytskikten och de underliggande skikten;
  - inre oxidering av baslegeringen;
  - att de kritiska elementen i baslegeringens härdningsfaser har utarmats;
  - mekaniska skador på ytbeläggningar, flagnings av ytbeläggningar med ett termiskt barriärskikt (TBC), sprickor i skyddsbeläggningens sköra ytskikt med ett lokalt miljörelaterat angrepp av baslegeringen som följd; och
  - högtemperaturkorrosion, se **avsnitt 1.5.3.2.9**.
2. Värmerelaterad degradering av baslegeringens mikrostruktur; till exempel:
  - Åldring och förgrovning av den primära och sekundära  $\gamma$ -strukturen (gamma prim) i utskiljningshårdade material.
  - Förgrovning och modifiering i karbidmorfologin (storlek, distribution och volymfraktion), utskiljning av nya karbider och förändringar i distributionen av lösta element i lösningshårdade i material.
  - Utskiljning av icke-önskade faser, vilket kan förekomma i alla typer av material.
3. Degradering av komponentens övergripande struktur; till exempel
  - Begynnande krypskada, både lokal och övergripande, inklusive förändringar orsakade av krypning som kan åtgärdas.
  - Krypskada och sprickor som utvecklats till förändringar som inte längre kan åtgärdas.
  - Termomekanisk utmattning (TMF) med ökande sprickbildning från ytbeläggningen till basmetallen.

Även om det uppkommer interaktion mellan flera förslitningssätt kan dessa tre grupper bedömas separat för analytiska ändamål. Grundläggande konstruktionsproblem kan upptäckas i de nödvändiga egenskaperna i alla grupper. För tidiga brott på den skyddande ytbeläggningen med intern oxidering av baslegeringen som följd beroende på höga lokala temperaturer i skovelmetallen i första ledskenan är ett exempel på grupp 1. Problem med sprickbildning på grund av termomekanisk utmattning på de roterande skovlarnas utloppskant i första steget hör till grupp 3.

#### *Hantering av livslängd och underhållsintervall hos komponenter*

Underhållsintervallet för en speciell komponent borde i allmänhet fastställas på så sätt att degraderingen av en komponent inte framskrider så långt att skadan inte längre kan repareras eller att komponenten inte kan rustas upp. Detta kräver att inget av de huvudsakliga degraderingssätten okontrollerat utvecklas till ett oåterkalleligt stadium.

Till exempel kan sprickindikationer som sträcker sig till basmetallen på skovlarna i första steget inte åtgärdas i komponentens lastbärande områden. Skovlar som uppvisar sådana sprickor kan därför inte repareras och måste kasseras. En sådan sprickbildning före utgången av den specifika livslängden är med andra ord ett tecken på konstruktionsproblem som borde avhjälpas av komponentens originaltillverkare. Sprickbildningen indikerar att komponentkonstruktionen ännu inte är fullt utvecklad och att konstruktionen högst antagligt kommer att ändras tills tillfredsställande driftprestanda kan garanteras. Ett exempel på den process som beskrivits här är turbinskoveln GE MS6001B i första steget. Om alla olika ledskenskonstruktioner,

skovelkylningsarrangemang, baslegeringar och ytbeläggningssystem beaktas har 14 olika versioner av denna komponent varit i produktion sedan den introducerades 1978.

Den typiska sannolika eller nominella livslängden hos den tyngst belastade (termiskt och mekaniskt) komponenten i heta områden ligger mellan 25 000 och 50 000 "ekvivalenta" drifttimmar. Antalet drifttimmar har i verkligheten tyvärr legat närmare den lägre gränsen, även om detta inte varit avsikten vid konstruktionen.

Den undersökta komponentkonstruktionens övergripande tillstånd och utvecklingsskede måste tydligt identifieras före valet av en ändamålsenlig metod att hantera livslängden hos en viss komponent.

Att analysera stabiliteten hos ytbeläggningen och baslegeringen är viktigt både i fråga om en färdigt utvecklad komponentkonstruktion och en ny, ännu inte utprovad konstruktion. Genom att kombinera analytiska modeller och fälterfarenhet (icke-förstörande bedömning av komponenter i drift och förstörande undersökning av kasserade komponenter) kan värdefull information tillföras och förädlas som underlag för omedelbart och framtida beslutsfattande.

Omfattande aerodynamiska, termiska och plastiska finita elementbaserade (spännings) beräkningar för analys av den övergripande strukturen i en viss specifik komponentkonstruktion ger endast ringa mervärde eller inget alls, om grundläggande konstruktionsproblem föreligger, eller om konstruktionen kommer att åtföljas av en ny inom en snar framtid. Ifall dessa analyser vore enkla att utföra, hade komponenter med grundläggande konstruktionsproblem (såsom sprickor på skovlarnas utloppskanter) aldrig avancerat till produktionsstadiet. Inte heller hade det varit nödvändigt med många utvecklingsstadier i produktionen.

### 2.3.2.3 Förbränningssystem

#### *Allmänna egenskaper*

Landbaserade tunga gasturbiner uppvisar tre grundläggande typer av förbränningssystem:

Brännkammare av silotyp har varit vanliga bland europeiska tillverkare i utförande med antingen enkel eller dubbel silo. Förbränningen sker i silon, som är en separat, nästan cylindrisk kammare fäst vid gasturbinen. Förbränningsgaserna leds till dysorna i första steget från en punkt (enkel silo) eller från två punkter mitt emot varandra (dubbel silo) längs inloppsområdet.

Ringformiga brännkammare har på senare tid favoriserats av tillverkare som tidigare använde förbränningsdelar av silotyp. En ringformig förbränningsdel bildar en ring med flera brännare som är fästa genom en väggsektion direkt framför dysorna i första steget.

Flamrörsbrännkammare med motström är i princip ett ringformigt system med brännare i flamrör. Förbränningsgasen leds sedan till dysorna i första steget med hjälp av ett mellanstycke. Mellanstyckena indelar förbränningen i sektioner. Antalet flamrör (och mellanstycken) beror på gasturbinens storlek. Motströmningen uppnås genom att kompressorluften leds nästan 180° bakåt från kompressorutloppet och tillbaka ytterligare 180° för att ledas framåt på nytt genom förbränningsdelarna. Motströmningssystemet gör att en kortare total längd uppnås mellan stödpunkterna eller lagren.

Mellanstycket är den heta gaskanalen mellan förbränningsdelen och turbinsektionen. Beroende på förbrännarkonstruktion kan mellansektionen bestå av en enkel kanal eller ett flertal sådana.

Brännkamrarna och mellanstyckena utsätts för de högsta temperaturerna och även för mycket snabba temperaturväxlingar i drift. De är därför konstruerade för höga värmelaster. Trots detta är de vid turbinunderhållen ofta föremål för inspektioner och reparationer med åtföljande utbyten av komponenter.

#### Material

Hastelloy X är en av de vanligaste legeringarna i komponenter i gasturbiners förbränningszon, till exempel mellankanaler och förbränningsdelar. I flygplansmotorer används detta material även i stor utsträckning i efterbrännare och utloppsrör. Hastelloy X är en lösningshårdad legering av nickel-krom-stål-molybden. Legeringen är oxidationsstälig, kan lätt bearbetas och har hög temperaturtålighet. Den har utmärkta formningsegenskaper, den kan smidas och på grund av sin goda tänjbarhet även kallbearbetas. Hastelloy X kan fabrikssvetsas med manuella och automatiska metoder inklusive metallbågsvetsning, TIG-svetsning (Tungsten, Inert, Gas) och MIG-svetsning (gasmetailbågssvetsning).

IN 617 är i likhet med Hastelloy X en lösningshårdad superlegering med tillsats av Co och en starkt reducerad Fe-halt. Aluminium i kombination med krom ger oxidationsbeständighet vid höga temperaturer. Legeringsämnena kobolt och molybden ger den lösningshårdande effekten. Kombinationen av hög hållfasthet och oxidationsbeständighet gör att IN 617 är ett bra material för kanaler (ducting), flamrör (combustion cans) och mellanstycken i både flygplansgasturbiner och landbaserade gasturbiner. I vissa applikationer har IN 617 eller en modifierad variant av denna, IN 625 (utan Co), valts i stället för Hastelloy X i syfte att uppnå högre hållfasthet och oxidationsbeständighet.

För att nå god beständighet mot högttemperaturkorrosion, till exempel vid frekvent oljeförbränning, kan legeringen Haynes 188 användas. På senare tid har utvecklingen av turbinkonstruktionerna lett till allt högre förbränningstemperaturer samtidigt som tillgången på kyluft minskat. Detta har i vissa fall lett till att man varit tvungen att övergå till starkare utskiljningshårdade material såsom Nimonic 263. Typiska sammansättningar av material för förbränningssystem presenteras i Tabell 2.3.2-2.

**Tabell 2.3.2-2. Nominell sammansättning (vikt-%) av material för förbränningssystem (Stoloff 1990).**

| Material    | Cr   | Mo  | Ni  | Co   | Fe   | W   | Nb  | Al  | Ti  | C    | B     |
|-------------|------|-----|-----|------|------|-----|-----|-----|-----|------|-------|
| Hastelloy X | 22   | 9   | bal | 1,5  | 18,5 | 0,6 | -   | -   | -   | 0,10 | -     |
| IN 617      | 22   | 9   | bal | 12,5 | -    | -   | -   | 1,0 | 0,3 | 0,07 | -     |
| IN 625      | 21,5 | 9   | bal | -    | 2,5  | -   | 3,6 | 0,2 | 0,2 | 0,05 | -     |
| Nimonic 263 | 20   | 5,9 | bal | 20   | -    | -   | -   | 0,5 | 2,1 | 0,06 | 0,001 |
| Haynes 188  | 22   | -   | 22  | bal  | 1,50 | 14  | -   | -   | -   | 0,05 | 0,01- |

Insidiga heta ytor i brännkammare och mellanstycken bekläds vanligtvis med ytbeläggningssmaterial med ett termiskt barriärskikt (TBC). Dessa



ytbeläggingsmaterial består antingen av ett plasmasprutat skikt eller av ett yttriumstabiliserad zirkonkeramiskt skikt som är elektronstråleförångat på ett metalliskt bindningsskikt av typen MCrAlY, som sedan tidigare termiskt sprutats på substratmetallen. I fall det är fråga om en tung brännkammare av silotyp kan skyddsbeläggningen också göras med hjälp av värmesköldplattor som ofta görs av ett liknande keramiskt skikt på en metallegering (t.ex. IN 617) som fästs med bultar på den underliggande konstruktionen.

#### 2.3.2.3.1 Skador i förbränningssystem

##### *Huvudsakliga mekanismer*

De huvudsakliga skade- och brottmekanismerna i fråga om komponenter i förbränningssystemet är i princip:

- Sprickbildning till följd av termomekanisk utmattning (TMF) och högcykelutmattning (HCF)
- Krypdeformation
- Lokal flagning av ytbeläggingsmaterial med termiskt ytskikt (TBC)
- Mekanisk nötning av kontaktytor
- Högtemperaturoxidation

Dessa mekanismer kan, antingen var för sig eller i kombination, leda till att maskinen stannar.

##### *Krypdeformation*

Komponenterna i förbränningssystemet är till sin konstruktion vanligtvis relativt väl skyddade mot krypdeformation och faktiska krypskador är sällsynta.

##### *Lokal flagning av ytbeläggningar*

Heta punkter, höga mekaniskt föranledda lokala töjningar eller eventuella problem avseende kontrollen av tillverknings- (eller reparations-) processen kan leda till lokal flagning av ytbeläggningar som har ett termiskt barriärskikt (TBC) hos komponenterna i förbränningssystemet.

##### *Mekanisk nötning av kontaktytor*

Små tryckpulseringar i förbränningsprocessen förorsakar att förbränningssystemet börjar vibrera med sin egen naturliga frekvens. Varje störning i förbränningen (injektering av vatten eller ånga, växlingar i bränsletillförseln, skadade eller okalibrerade bränsledysor eller störningar i kylningsflödet) höjer betydligt dessa vibrationsnivåer och ökar därigenom nötningshastigheten på kontaktytor hos komponenterna.

Inspjutning av vatten är i detta fall mycket värre än insprutning av ånga. Ett vatten/ång-bränsleförhållande på 1,8 påskyndar enligt observationer nötningsprocessen med faktorn 2,2 i fråga om vatten och 1,2 i fråga om ånga.

I ett typiskt flamrörsförbränningssystem till exempel upptäcks nötningen på komponenterna vanligtvis på följande ställen: foder, spridarmunstycken, övertändningsrör mellan brännkammare, fjädertätningar (hula seals), stöd för mellanstycken (bull horn brackets) och mellanstyckenas bakre tätningar (Figur 2.3.2-2).



**Figur 2.3.2-2. Nötning av bakre tätning på ett mellanstycke..**

**Figure 2.3.2-2. Transition piece aft seal groove wear.**

#### *Termomekanisk utmattning och högcykelutmattning*

Premix-förbränning i ett förbränningssystem med ett torrt 'Low NO<sub>x</sub>' (DLN) eller ett torrt 'Low Emission' (DLE) kan vara mycket mer instabilt än en diffusionsflamförbränning i ett standardsystem. Den dynamiska tryckpulseringen ökar när förbränningsenergiutlösningen och det akustiska beteendet hos hela förbränningssystemet interfererar med varandra. Om detta sker okontrollerat kan det leda till stora skador på komponenterna till följd av utmattning genom mekanismerna i termomekanisk utmattning (TMF) och högcykelutmattning (HCF).

Termomekanisk utmattning kan även framkallas av ett stort antal laständringar eller uppstartnings-nedkörningsperioder i driften av enheten.

#### *Högtemperaturoxidation*

Högtemperaturoxidering kan emellanåt upptäckas i vilken komponent som helst i förbränningssystemet (Figur 2.3.2-3). Orsaken är vanligtvis lokala heta punkter förorsakade av störningar, antingen i förbränningsdelens utloppstemperaturprofiler, eller i komponenternas kylfluetsflöde. I ett fåtal fall tillåts en viss oxidation i en komponent till och med i konstruktionen för att kompensera bristen på en dyr "offerytbeläggning".



**Figur 2.3.2-3. Ytoxideration på ett mellanstycke.**

**Figure 2.3.2-3. Surface oxidation in a transition piece.**

#### 2.3.2.3.2 Provning av förbränningssystem

Stora utmattningsprickor (över 5 mm långa) kan upptäckas visuellt med hjälp av en boroskopinspektion (endoskop) utan demontage av anläggningen. En standardpenetrantprovning med fluorescerande färger (FPI, PT) krävs för att upptäcka defekter med en storlek på 1 - 5 mm, även om en ytinspektion av denna typ även kan göras för avsökning av större sprickor.

I lösningshårdade material (t.ex. Hastelloy X, IN 617), kontrolleras utmattningshållfastheten hos legeringen huvudsakligen genom distributionen av karbider. Detta ändras under driften eftersom karbidstrukturen blir grövre under långvarig drift i hög temperatur. Genom en riktig värmebehandlingsperiod kan basmaterialens ursprungliga egenskaper i stort sett återställas. I de flesta fall är det nödvändigt med lösningsbehandling. Aldring sker under komponentens drift. Behovet av att återställa utmattningsegenskaperna kan bedömas genom att karbidstrukturen undersöks med replikteknik.

#### 2.3.2.3.3 Återstående livslängd hos förbränningssystem

Livslängdshantering för ett förbränningssystem är en fortlöpande process med återkommande kampanjer som syftar till att återställa systemet inklusive kanalsystemet för att säkerställa störningsfri drift vid följande planerade driftperiod. Inspektionsresultaten levererar i detta fall den allra väsentligaste informationen om vilka reparationer och utbyten av delar som är nödvändiga.

#### 2.3.2.4 Ledskenor

##### *Allmänna egenskaper*

Ledskenornas funktion i det första steget är att leda den heta gasen från förbränningsdelen, vända den och i normala fall driva fram den till första rotationssteget med en optimal vinkel. Dessa ledskenor är exponerade för den högsta gastemperaturen i turbinen, den högsta gashastigheten samt även mycket snabba termiska transienter vid uppstarter. Eftersom ledskenorna är stationära härrör de enda spänningarna (med undantag för eventuella restspänningar) från den aerodynamiska belastningen och temperaturväxlingar.

##### *Material i ledskenor*

Följande egenskaper krävs av de första stegens ledskenor:

- Hög oxidations- och korrosionsbeständighet
- Hög tålighet mot termisk utmattnings
- Relativt god svetsbarhet för underlättande av tillverkning och reparationer
- God gjutbarhet för tillverkningsändamål

Det första stegets ledskenor har fördelen att vara relativt korta och stöttade vid båda ändarna. De stationära ledskenorna i de bakre stegen är svårare att stöda vid den inre ändan, och de är också längre och smäckrare. För dessa komponenter är även en hög kryphållfasthet i baslegeringen en viktig egenskap.

Koboltlegeringar har i stor utsträckning använts för stationära ledskenor i både landbaserade turbiner och flygmaskinsgasturbiner på grund av sin ypperliga korrosions/oxidationsbeständighet, värmechocktålighet och goda svetsbarhet jämfört med nickellegeringar. De vanligaste legeringarna är Mar M-509, X-45 och varianter av dessa, ECY 768 respektive FSX 414. Dessa legeringar hårdas i en fast lösning som innehåller karbider och legeringselement. Till följd av detta är de mekaniska egenskaperna som bestämmer turbinledskenornas grundläggande livslängd beroende av karbidmorfolo­gin (storlek, distribution och volymfraktion).

Nickelbaslegeringen IN738LC har varit allmänt använd i tunga landbaserade maskiner under de senaste 25 åren, och har använts både för stationära ledskenor och roterande skovlar. Även IN939 används i ledskenor på grund av dess goda oxidationsbeständighet och stora materialhållfasthet. IN939 är relativt svårt att reparera eftersom svetsning lätt ger upphov till små sprickor i det värmeutsatta området. I syfte att eliminera dessa sprickor har legeringen GTD-222 tagits fram med lägre halter av Al och Ti än i IN939. Typiska materialsammansättningar för ledskenor presenteras i Tabell 2.3.2-3.

Ledskenornas ytbeläggning i de första stegen är vanligtvis beständig mot högttemperaturoxidation. Metalliska "offerytbeläggningar" av typen MCrAlY (M = Co, Ni) används i stor utsträckning tillsammans med plasmasprutningsmetoden med vakuum/lågtryck (VPS/LPPS). Utöver detta är en del av de första stegens ledskenor utrustade med en termiskt isolerande yttriumstabiliserad zirkoniumytbeläggning med ett termiskt barriärskikt (TBC) i syfte att minska basmetallens temperatur i skovel­n och utjämna eventuella heta punkter. För ledskenor i de bakre stegen eller ledskenor som används i mindre krävande tillämpningar används också tunnare diffusionsytbeläggningar (aluminide).

Tabell 2.3.2-3. Nominell sammansättning (vikt-%) av ledskenmaterial (Erickson 1990; Stoloff 1990).

| Material                | Cr   | Mo   | Ni   | Co  | Fe       | W   | Ta   | Nb  | Al  | Ti  | C    | B          |
|-------------------------|------|------|------|-----|----------|-----|------|-----|-----|-----|------|------------|
| Mar M-509               | 24   | -    | 10   | bal | 1        | 7   | 7,5  | -   | -   | 0,2 | 0,60 | -          |
| X45                     | 25,5 | -    | 10,5 | bal | 2<br>max | 8   | -    | -   | -   | -   | 0,25 | 0,01       |
| ECY 768                 | 21,5 | -    | 10   | bal | 1        | 7   | 3,5  | -   | -   | 0,2 | 0,60 | 0,1<br>max |
| FSX 414                 | 28   | -    | 10   | bal | 2<br>max | 7   | -    | -   | -   | -   | 0,25 | 0,012      |
| IN 738 LC <sup>1)</sup> | 16   | 1,75 | bal  | 8,5 | -        | 2,6 | 1,75 | 0,9 | 3,4 | 3,4 | 0,11 | 0,01       |
| IN 939 <sup>2)</sup>    | 22,4 | -    | bal  | 19  | -        | 2   | 1,4  | 1   | 1,9 | 3,7 | 0,15 | 0,009      |
| GTD-222 <sup>3)</sup>   | 22,5 | 2,3  | bal  | 19  | -        | 2   | -    | -   | 0,8 | 1,2 | 0,08 | 0,01       |

<sup>1)</sup> med 0,04% Zr; <sup>2)</sup> med 0,10% Zr <sup>3)</sup> med 0,10% V

#### 2.3.2.4.1 Skador hos ledskenor

Det första stegets ledskenor i turbinsektionen är den komponent som är utsatt för den högsta termiska belastningen. Den utsätts även för de största temperaturtransienterna under lastsvängningar, uppstarter och stopp av anläggningen. I baslastanläggningar med jämn drift är de viktigaste skademekanismerna krypdeformation, nedbrytning av ytskiktet och förändringar i baslegeringens mikrostruktur. I anläggningar med omfattande cyklisk drift spelar termomekanisk utmattning den viktigaste rollen, och i de flesta fall kommer sprickpropagering att begränsa komponentens livslängd eller reparationsintervall.

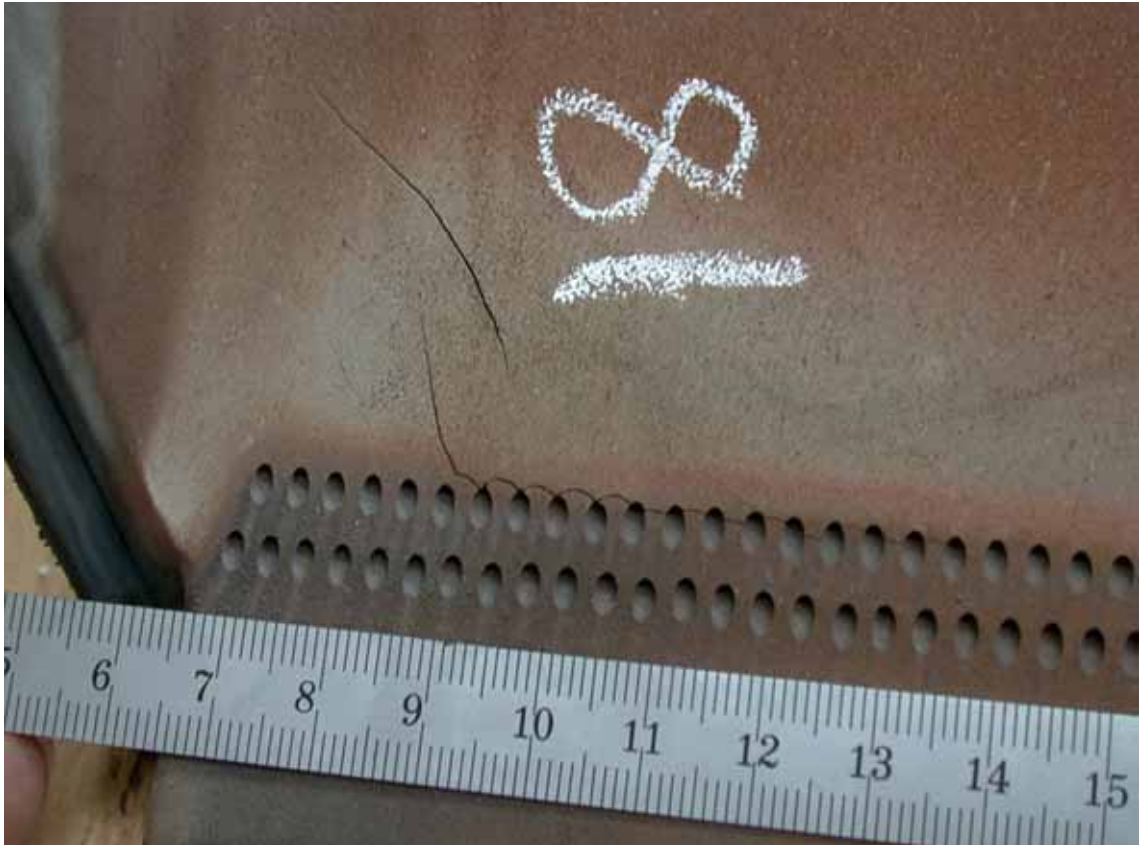
##### *Termomekanisk utmattning (TMF)*

Sprickbildning till följd av termomekanisk utmattning (TMF) förorsakas av höga lokala töjningsgradienter som ingår i driftrelaterade temperaturtransienter (Figur 2.3.2-4). Tidigare var gjutningen av ledskenssegmentet en relativt kostsam investering som innefattade två eller till och med tre ledskenor. Göten var mycket styva och inte tillräckligt flexibla för att kunna hantera deformationer föranledda av temperaturtransienter. I de nya maskinerna med högre förbränningstemperatur är ledskenorna gjutna i form av enkla ledskenor med en starkt minskad tendens till sprickbildning till följd av termomekanisk utmattning i inre och yttre tak till dessa

I steg med inre kylning av själva ledskenan och övergångsområdena mellan ledskena och tak exponerade för TMF-relaterad sprickbildning om anläggningen utsätts för ett stort antal lastcykler. Under stabil drift är den yttre ytan av en komponent med inre kylning utsatt för tryckspänning och den inre ytan för dragspänning. Spänningar förorsakade av olikheterna i värmeutvidgningen mellan inre och yttre ytor lättar i någon mån under långvarig drift. Vid stopp av anläggningen, eller ännu värre om den nödstoppas, leds kyluft genom turbinen och de yttre ytskikten hos komponenterna avkyls snabbt. Detta medför en hög dragspänning i det yttre ytskiktet, vilket leder till



utveckling av termomekaniska utmattningsskador med sprickbildning och sprickpropagering.



**Figur 2.3.2-4. TMF-relaterad sprickbildning i ett ledskenssegment i första steget.**

**Figure 2.3.2-4. TMF-cracking in a first stage vane segment.**

### *Krypdeformation*

Under normala driftförhållanden är krypdeformation inget omfattande problem för det första stegets ledskenor. Orsaken till detta är att dessa ledskenor oftast är ganska korta och stöttade vid båda ändorna. Lokal krypdeformation på ledskenorna kan ibland observeras ifall förbränningsdelens utloppstemperaturprofil uppvisar heta punkter eller ifall komponentkylningen på något sätt varit otillräcklig.

I fråga om ledskenorna i de bakre stegen kan krypdeformation bli ett problem. Dessa ledskenor är endast stöttade från den yttre ledskensramen (shroud) och de är ofta också längre och relativt klena. Den aerodynamiska elastningen ger en böjkraft, vilket efter långvarig drift med hög temperatur kan resultera i krypdeformation kallad nedströmsdeflektion (down stream deflection). Under denna process kommer det axiella läget av stegets inre ledskensram (shroud) att röra sig nedströms. Detta förorsakar ett stort läckage av het gas som höjer temperaturen mellan rotorskivorna.

### Ytnedbrytning

Miljörelaterad nötning på komponenters ytskikt i moderna gasturbiner är ett stort problem för alla komponenter i heta områden. Exempel på dessa nedbrytningssätt är:

- utarmning av de oxidbildande elementen (Al, Cr) i ytskikten och de underliggande skikten;
- inre oxidation i baslegeringen;
- utarmning av kritiska element i baslegeringens härdningsfaser;
- mekaniska defekter i ytbeläggningarna, TBC-relaterad flagning i skyddsbeläggningens sköra skikt åtföljd av miljörelaterat angrepp av baslegeringen i närheten av sprickkanten; och
- högtemperaturkorrosion, se **avsnitt 1.5.3.2.9**.

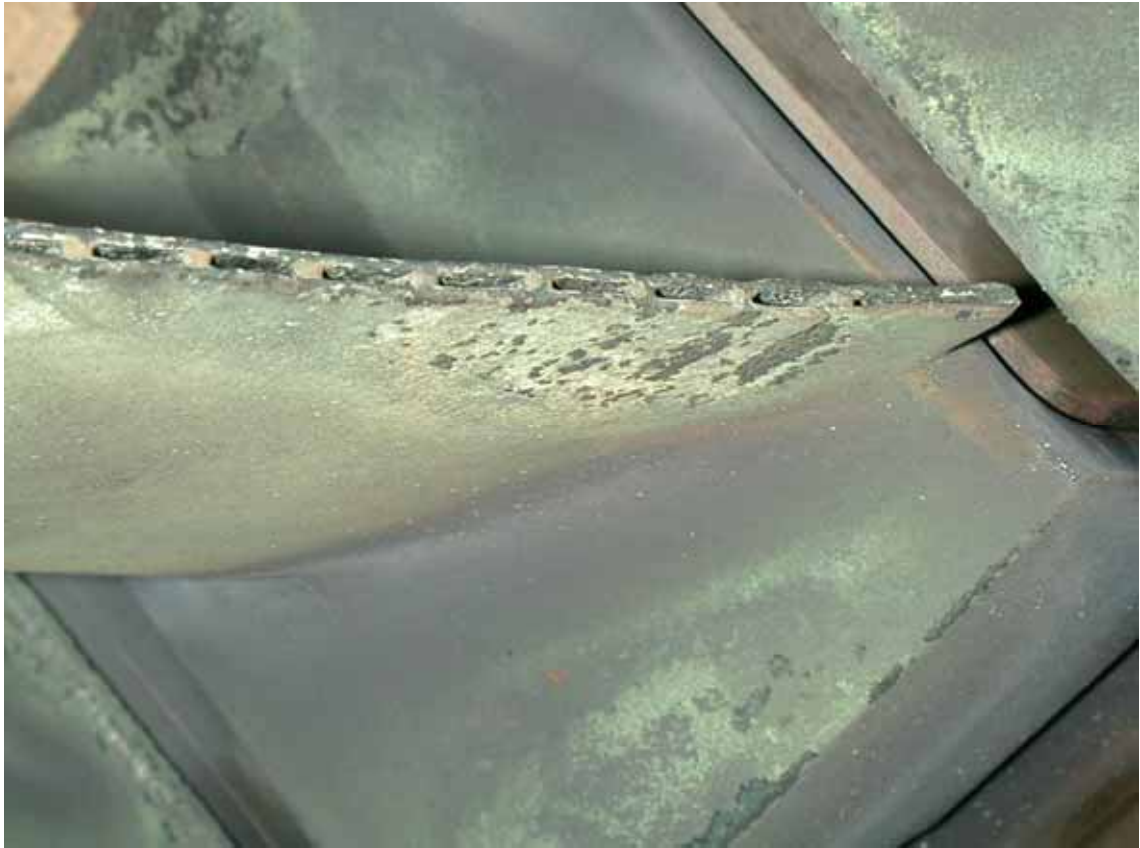
Alla ledskenor åtminstone i den heta ändan är skyddade med "offerytbeläggning". Hanteringen av underhåll av dessa komponenter grundar sig på att underhållsintervallen planeras på så sätt att ytbeläggningarna kan förnyas innan de helt och hållet förlorar sina skyddande egenskaper. För detta är det nödvändigt att förstå både anläggningens driftkaraktistika och det fundamentala om ytbeläggningsegenskaper.

I en modern förbränningsturbin eldad med ren naturgas är högtemperaturkorrosion vanligtvis inte ett stort problem. Detta beror på att det i aktuella typer av högtemperaturkorrosion krävs svavel (S) i förbränningsprocessen. Av den orsaken behandlas högtemperaturkorrosion inte mer ingående här, men beskrivs närmare i **avsnitt 1.5.3.2.9**.

Högtemperaturoxidation (Figur 2.3.2-5) och mekanisk skada på ytbeläggningen är de största orsakerna till ytnedbrytning. Jakten på ständigt högre förbränningstemperaturer och bättre prestanda kräver kompromisser i fråga om oxidationsbeständighet i komponenternas baslegeringar till fördel för förbättrade mekaniska egenskaper. För att kunna använda baslegeringar med goda mekaniska egenskaper är det nödvändigt att använda skyddande ytbeläggningar som är oxidationsbeständiga.

Ytbeläggningsegenskaperna grundas på att det kontinuerligt bildas en stabil skyddande oxidhinna på komponentens ytskikt. Halten av detta oxidbildande element, huvudsakligen Al mot oxidation och Cr mot korrosion, i ytskiktet måste vara tillräckligt hög för att garantera tillgången på dessa element mellan underhållsintervallen. Om ytbeläggningen utarmas på skyddande element, kommer fritt syre att spridas i baslegeringen och bilda oxider med basmaterialets legerande element (främst Al). Samtidigt sprids dessa element även utåt mot komponentytan och bildar oxider på denna. Vardera processen är oåterkallelig och kommer även att utarma baslegeringen på dess  $\gamma$ -härdande fas.





**Figur 2.3.2-5.** Övergripande ytbeläggningsskada förorsakad av högttemperaturoxidation på en ledskena i andra steget.

**Figure 2.3.2-5.** Total coating failure caused by high temperature oxidation in a second stage vane.

#### *Nedbrytning av mikrostrukturen i en baslegering*

Termiskt relaterad nedbrytning av mikrostrukturen i en baslegering uppträder som

- förgrovning av den primära och sekundära  $\gamma'$ -strukturen i utskilningshårdade material;
- förgrovning och modifiering i karbidmorfologin (storlek, distribution och volymfraktion), utskiljning av nya karbider och förändringar i distributionen av det lösta ämnet i lösningshårdade material; och
- utskiljning av icke-önskvärda faser i alla material som gör dem spröda och försvagade.

Nedbrytning i mikrostrukturen kan tolereras eller åtminstone avhjälpas med värmebehandling ifall förstörelseprocessen inte avancerat för långt. Det observerade tillståndet av nedbrytning kan även tillämpas för bedömning av komponentens kondition och drifhistoria, på ungefär samma sätt som i fråga om roterande skovlar (se **avsnitt 2.3.2.5**).

#### *2.3.2.4.2 Provning av ledskenor*

Eftersom TMF är en av de viktigaste skademekanismerna för ledskenor används i stor utsträckning okulär inspektion i kombination med penetrantprovning med fluorescerande färger (FPI) både med ledskenorna på plats och även i övrigt för att

bedöma deras allmänna kondition. Ytbeläggningssystemets allmänna kondition kan bedömas okulärt med avseende på lokala (eller utbredda) heta punkter och flagnig av ytbeläggningar med ett termiskt barriärskikt. Exempel på mindre frekventa provningsmetoder är virvelström (huvudsakligen för sprickor i ytskikt och närmast underliggande skikt), ultraljud (främst för fästen (attachments/shrouds)) och radiografisk eller röntgeninspektion till exempel för blockerade kylkanaler. In situ-inspektioner kan även kompletteras med boroskopinspektioner (endoskop) som inte kräver att turbinen öppnas, även om detta förfarande är möjligt endast för ledskenor på vissa platser.

Vid behov bedöms konditionen hos baslegeringen och skyddsytseläggningen under ytskiktet med hjälp av förstörande metallografisk bedömning av ett prov på ett eller högst ett fåtal ledskenaelement. Förstörande provning används i allmänhet för att bedöma:

- Skyddssystemets status i fråga om sprickor och förlust av skyddselement
- Baslegeringens nedbrytningsstatus (förgrovnig av härdningsfaser, ökande försprödning eller utskiljning av skadeinitierande faser)
- Status av eventuella diffusionsskikt eller andra indikatorer på temperaturhistoria

För att detektera krypdeformation vid mellanrummet mellan två ledskenor och den potentiella nedströmsdeflektionen kan hela ledskenssteget kan mätas fysikaliskt.

#### 2.3.2.5.3 Återstående livslängd hos ledskenor

Livslängdshantering för ledskenor är också en fortlöpande process med återkommande underhåll som syftar att återställa ledskenans tillstånd för att trygga följande planerade driftperiod. Inspektionerna ger den väsentliga informationen om nödvändiga reparationer eller utbyten för detta ändamål.

I synnerhet i det första stegets ledskenor kan en viss TMF-sprickning upp till åtminstone några millimeters längd tolereras utan att ett omedelbart reparationsbehov föreligger. Orsaken till detta är att den drivande kraften bakom TMF-relaterad sprickbildning inom många områden kan minska eller åtminstone inte öka så mycket på grund av att sprickorna ger en ytterligare strukturell kompliance. Reparationer eller utbyten är i vilket fall som helst nödvändiga ifall omfattande sprickning föreligger eller när två sprickor tillväxer på ett sätt som kunde leda till att en del av ledskenan lossar under nästa driftperiod. Lokal reparation av sprickor är ofta möjlig om basmaterialet inte utsatts för omfattande oåterkallelig nedbrytning.

Krypdeformation tolereras till en viss utsträckning, som dock normalt begränsas av omfattande gasläckage i takändar eller böjning av ledskenan. En böjd ledskena kan i värsta fall röra vid de roterande skovlarna på följande rad under nästa driftperiod, vilket bör förhindras.

Ytnedbrytning i den metalliska skyddsytseläggningen bör inte få utvecklas så långt att halten av det skyddande oxidbildande elementet (främst Al) underskrider ett kritiskt värde som fastställts för att indikera att ytbeläggningen kan förlora sin skyddande funktion under nästa driftperiod. Sprickor genom denna ytbeläggning får inte nå baslegeringen under nästa driftperiod. En keramisk ytbeläggning med ett termiskt barriärskikt (TBC) bör vara intakt och vidhängande utan något märkbart oxidskikt mellan TBC och bindingsbeläggningen. Omfattande inre oxidation eller utarmning av härdningsfasen ( $\gamma$ ) i baslegeringen skulle indikera att ytbeläggningen förlorat sin skyddande förmåga. Tjockleken av diffusionsskiktet mellan ytbeläggningen och

baslegeringen kan också indikera den termiska historien under drift. Tecken på överhettning, stark yttre oxidation eller högtemperaturkorrosion kan kräva avhjälpande åtgärder som syftar till att minska de lokala temperaturerna eller annan miljöbelastning snarare än att bara reparera själva komponenterna.

För de flesta fall av skada har tillverkarna maskin- och komponentspecifika skadegränsvärden (även om de kanske inte alltid publicerar sådana) enligt vilka man kan bedöma om skadan kan tolereras för fortsatt drift av komponenten i fråga. Likaså har tillverkarna gränsvärden för delar som enligt bedömning kan repareras. Komponentens livslängd fram till nästa reparation respektive utbyte definieras normalt av en eller högst ett fåtal skademekanismer åt gången och måste bedömas på nytt efter varje reparations- och driftcykel. Skademekanismerna måste fastställas entydigt varje gång för att ändamålsenliga livslängdskriterier skall kunna slås fast.

Flera av skademekanismerna som begränsar livslängden är relativt starkt temperaturberoende på så sätt att skadeförloppet blir snabbare med ökande temperatur. Detta gör att temperaturgränsvärden är speciellt viktiga för livslängdshantering. Å andra sidan kan den faktiska drifttemperaturen som en komponent utsätts för ofta bedömas utgående från materialets aktuella tillstånd vid detaljerad inspektion av materialet.

#### 2.3.2.5 Skovlar

##### *Allmänna egenskaper*

De roterande skovlarna är mekaniskt mycket hårdare belastade än de stationära ledskenorna. Detta beror förutom på de aerodynamiska krafterna också på att dessa delar är utsatta för en stor centrifugalkraft.

Den roterande skoveln i första steget är ur konstruktionsperspektiv den mest kritiska och krävande komponenten i hela gasturbinen. Detta är också den komponent som speciellt begränsar en ökning av turbinens inloppstemperaturer och därigenom gasturbinens termiska verkningsgrad.

I och med att förbränningsgaserna expanderar inom turbinsektionen, ökar storleken på skovlarna och därför också de mekaniska centrifugalkrafterna som skovlarna utsätts för i turbinens bakre skovelsteg. Eftersom temperaturen sjunker mot de bakre stegen minskar emellertid kraven på hållfasthet och skyddande ytbeläggning hos materialet. Därför är baslegeringens material, ytbeläggningar och kylarrangemang för skovlarna i de bakre stegen för det mesta mer konventionella än för skovlarna i det första steget.

##### *Material*

Kraven på baslegeringen i roterande skovelmateriel är:

- Utmärkta kryp och TMF-egenskaper
- Goda tillverkningsegenskaper (främst gjutbarhet)
- Stabil mikrostruktur under långvarig drift vid hög temperatur
- God oxidationsbeständighet

År 1971 introducerades materialet IN738 för roterande skovlar i syfte att förbättra korrosionsbeständigheten. IN 738 har tills nyligen varit det överlägset mest använda skovelmaterialet. Det finns även en patentskyddad legering GTD-111 för liknande tillämpningar. Smidesnickellegeringarna Udimet 500, 520 och 700 samt X-750 har

använts i stor utsträckning av flera tillverkare, speciellt i skovlar i de bakre stegen där kraven på hållfasthet och kylning inte är så stränga.

På senare tid har material med riktat stelnande (DS) och enkristallmaterial (SC eller SX) lanserats i skovlar för de mest krävande första stegen. I DS-material är orienteringen av korngränser kontrollerad med avseende på att minimera eller fullständigt utesluta interkristallin krypsprickbildning. I SC-material är korngränser helt eliminerade. Detta erbjuder en betydande fördel vad gäller både kryphållfasthet och krypduktilitet liksom även TMF-hållfasthet. Sammansättningen av några typiska skovelmaterier presenteras i Tabell 2.3.2-4.

**Tabell 2.3.2-4. Nominell sammansättning (vikt-%) av skovellegeringar (Erickson 1990; Stoloff 1990).**

| Material                | Cr   | Ni  | Co   | Mo   | Fe | W   | Ta   | Nb  | Al  | Ti  | C    | B     | Zr   |
|-------------------------|------|-----|------|------|----|-----|------|-----|-----|-----|------|-------|------|
| X-750 <sup>1)</sup>     | 15,5 | bal | -    | -    | 7  | -   | -    | 1   | 0,7 | 2,5 | 0,04 | -     | -    |
| Udimet500 <sup>1)</sup> | 18   | bal | 18,5 | 4    | -  | -   | -    | -   | 2,9 | 2,9 | 0,08 | 0,006 | -    |
| Udimet520 <sup>1)</sup> | 19   | bal | 12   | 6    | -  | 1   | -    | -   | 2   | 3   | 0,05 | 0,005 | -    |
| Udimet700 <sup>1)</sup> | 15   | bal | 17   | 5    | -  | -   | -    | -   | 4   | 3,5 | 0,06 | 0,030 | -    |
| Udimet720 <sup>1)</sup> | 17,9 | bal | 14,7 | 3    | -  | 1,3 | -    | -   | 2,5 | 5   | 0,03 | 0,033 | 0,03 |
| IN 738 LC <sup>2)</sup> | 16   | bal | 8,5  | 1,75 | -  | 2,6 | 1,75 | 0,9 | 3,4 | 3,4 | 0,11 | 0,010 | 0,05 |
| GTD 111 <sup>2)</sup>   | 14   | bal | 9,5  | 1,5  | -  | 3,8 | 2,8  | -   | 3   | 4,9 | 0,10 | 0,010 | -    |
| GTD 111DS <sup>3)</sup> | 14   | bal | 9,4  | -    | -  | 3,7 | 3    | -   | 3   | 5   | 0,10 | 0,010 | 0,01 |
| CMSX-4 <sup>4)</sup>    | 8,7  | bal | 9    | 0,6  | -  | 6   | 6,5  | -   | 5,6 | 1   | -    | -     | -    |
| CMSX-10 <sup>5)</sup>   | 9    | bal | 3    | 0,4  | -  | 5   | 8    | 0,1 | 5,7 | 0,2 | -    | -     | -    |

<sup>1)</sup> smideslegering

<sup>2)</sup> gjuten polykristallin,

<sup>3)</sup> DS-legering, 0,15 Hf;

<sup>4)</sup> SC-legering, 0,1 Hf + 3 Re;

<sup>5)</sup> SC, 0,03 Hf + Re

Skovlarna är för det mesta ytbelagda så att de är skyddade mot högttemperaturoxidation. Metalliska offerytbeläggningar av typen MCrAlY (M = Ni, Co) förekommer, liksom i ledskenor, i stor utsträckning. I vissa fall kan skovlarna i de första stegen ytterligare skyddas med en ytbeläggning med ett termiskt barriärskikt (TBC) i syfte att sänka metalltemperaturen i sådana skovlar som har inre kylning. I mer konventionella turbiner förekommer metalliska diffusionsytbeläggningar (aluminide) allmänt i skovlarna i de bakre stegen och i de inre kylkanalerna. I samtliga fall härrör ytbeläggningens skyddande funktion från metallytans regenererande täta oxidskikt och från sänkt metalltemperatur i fallet av ytbeläggning med ett termiskt barriärskikt (TBC).

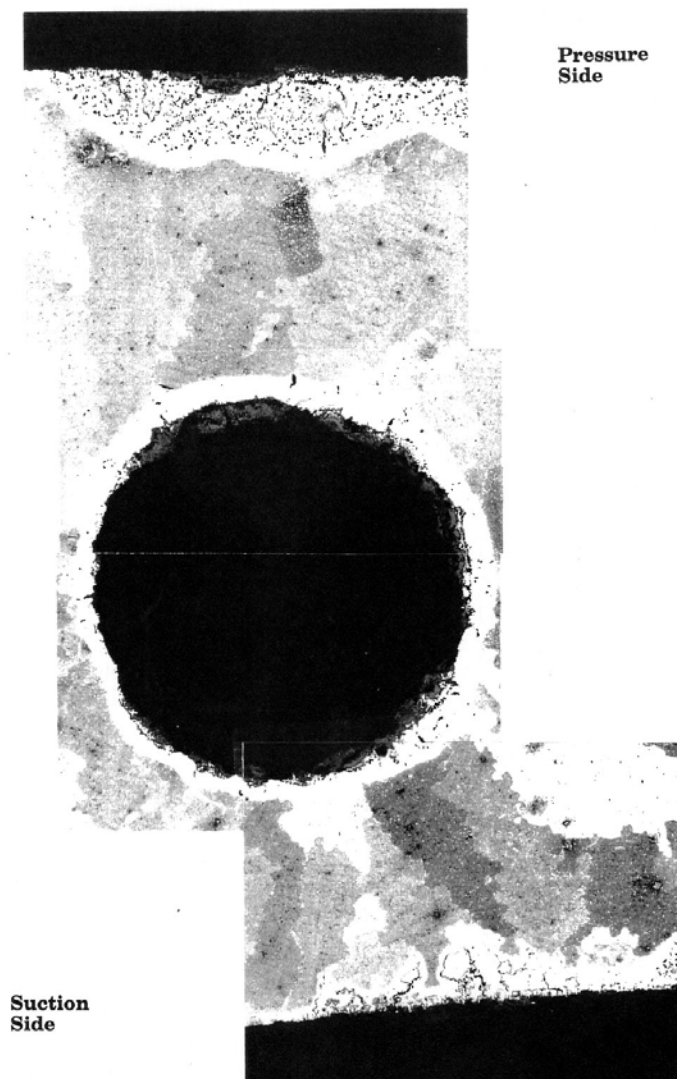
#### 2.3.2.5.1 Skador i skovlar

Den vanligaste skadan för en skovel i första steget är en slagskada förorsakad av lösa föremål i turbinens inloppsflöde.

De viktigaste av skademekanismerna som uppkommer vid normal drift är nedbrytning av komponentens ytskikt, värmerelaterade förändringar i mikrostrukturen och TMF-relaterad sprickbildning och krypdeformation.

#### *Ytnedbrytning*

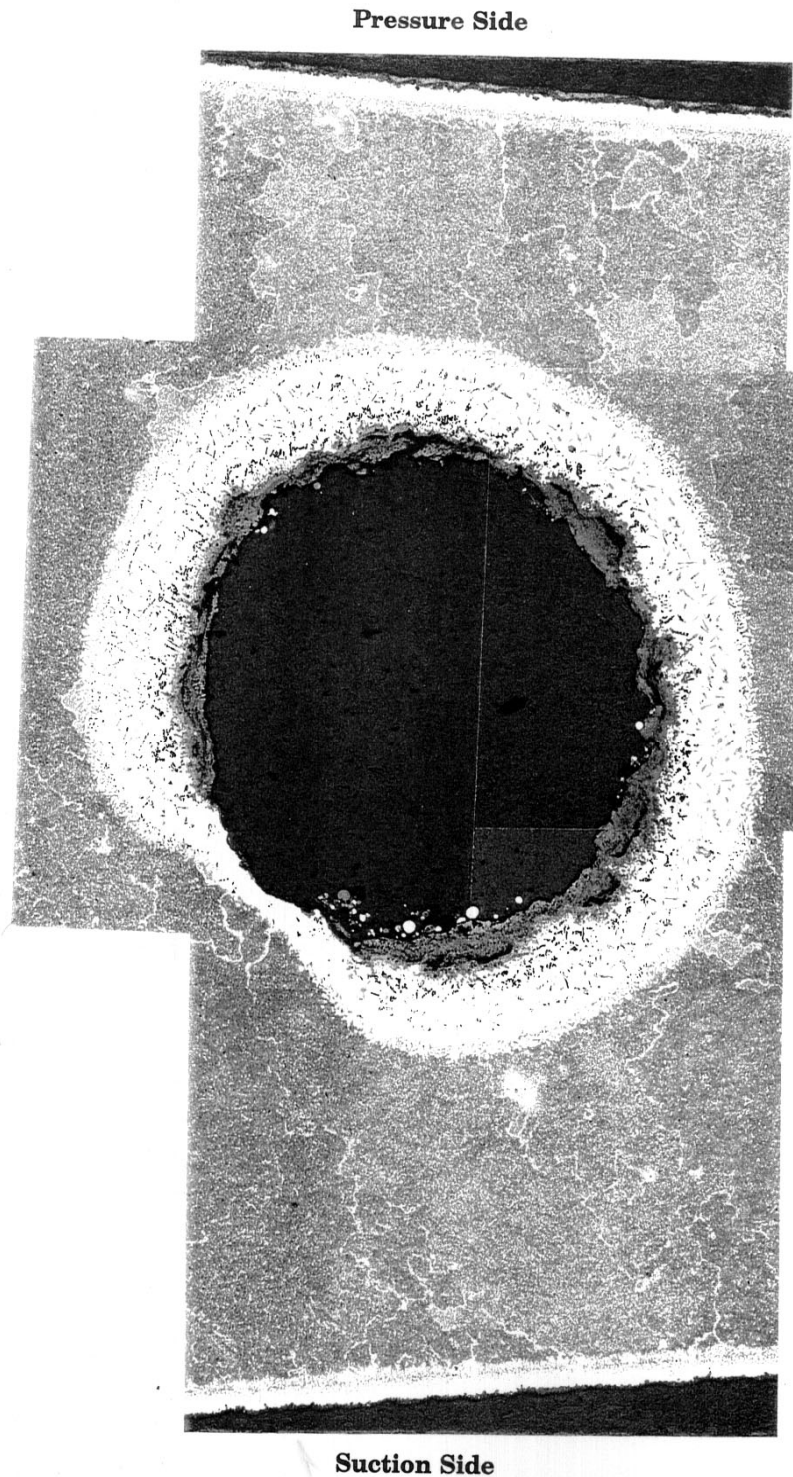
I likhet med situationen för ledskenor är högttemperaturoxidation snarare än högttemperaturkorrosion av den skyddande ytbeläggningen både på skovelns yttre ytskikt och på de insidiga kylkanalväggarna det största problemet för turbiner eldade med naturgas (Figurer 2.3.2-6 till 2.3.2-8).



**Figur 2.3.2-6.** Tvärsnitt av skovel vid sista kylöppningen i utloppskantens område vid 90 % höjd som visar ett angrepp av den icke ytbelagda kylöppningen och de ytbelagda skovelytorna. Det vita området som omger hålet är ett legeringsutarmat skikt där de härdande elementen avlägsnats från metallen. 52,5X.

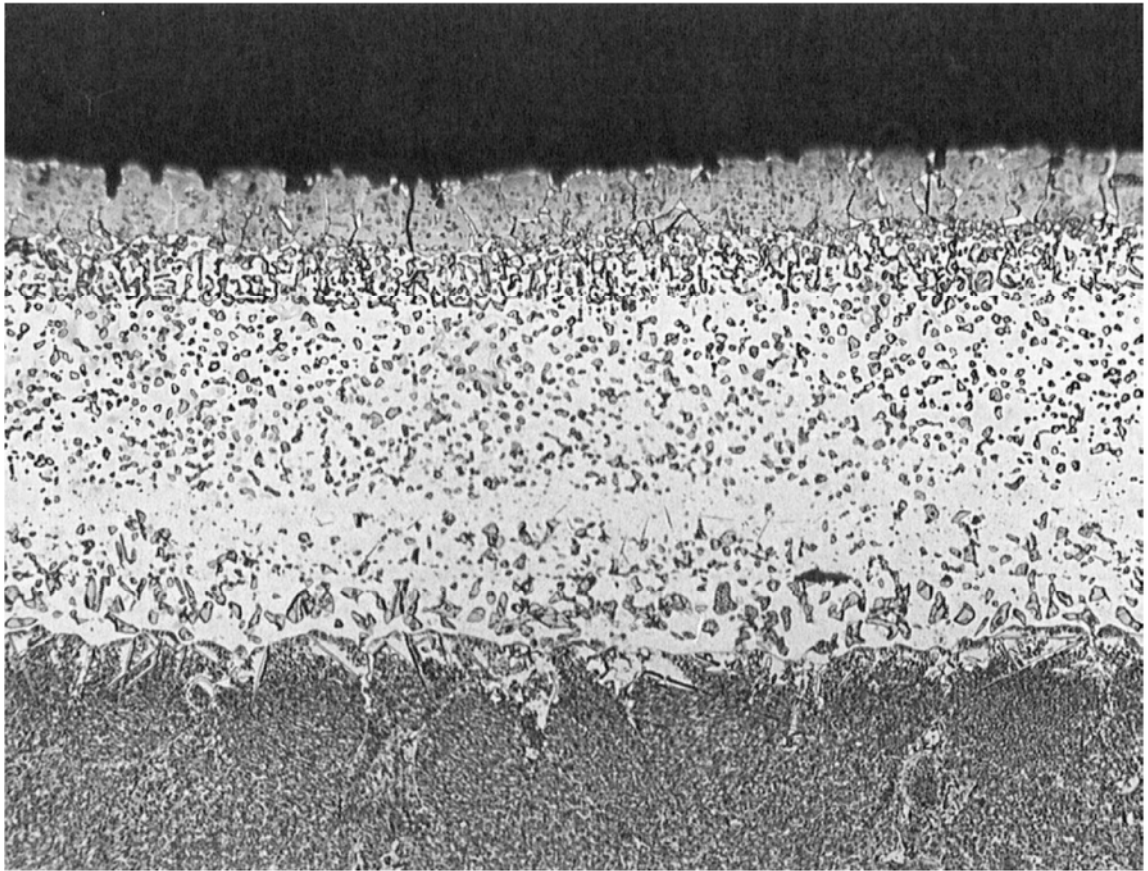
**Figure 2.3.2-6.** Blade cross-section at the last cooling hole in the trailing edge area at 90% height showing attack from the uncoated cooling hole and both coated airfoil surfaces. The white area surrounding the hole is an alloy-depleted layer in which the strengthening elements have been removed from the metal. 52,5X.





**Figur 2.3.2-7** Tvärsnitt av skovel vid sista kylöppningen vid utloppskantens område på 60 % höjd som visar ett angrepp från den icke-ytbelagda kylöppningen. Jämfört med föregående figur har detta område av samma skovel utsatts för betydligt lägre yttemperatur och ytbeläggningen ännu har kvar sina skyddande egenskaper. 52,5 X.

**Figure 2.3.2-7.** Blade cross-section at the last cooling hole in the trailing edge area at 60% height showing attack from the uncoated cooling hole. Compared to the previous picture, this section of the same blade has been running at substantially lower surface temperature, because the coating is still protective and intact. 52,5 X.



**Figur 2.3.2-8.** Tvärsnitt av skovelyta på sugsidan efter långvarig drift. Bilden visar ett 50 µm diffusionsskikt under en termiskt sprutad 130 µm MCrAlY-ytbeläggning som är överdragen med en 40 µm diffusionsytbeläggning med aluminide. Skovelytan ses vid bildens ovkant; 200 X.

**Figure 2.3.2-8.** Blade surface cross-section on the suction side after prolonged service, showing a 50 µm interdiffusion layer below a thermally sprayed 130 µm MCrAlY coating which has been topped with a 40 µm aluminide diffusion coating. Blade surface on top; 200 X.

#### *Nedbrytning av mikrostrukturen i baslegeringen*

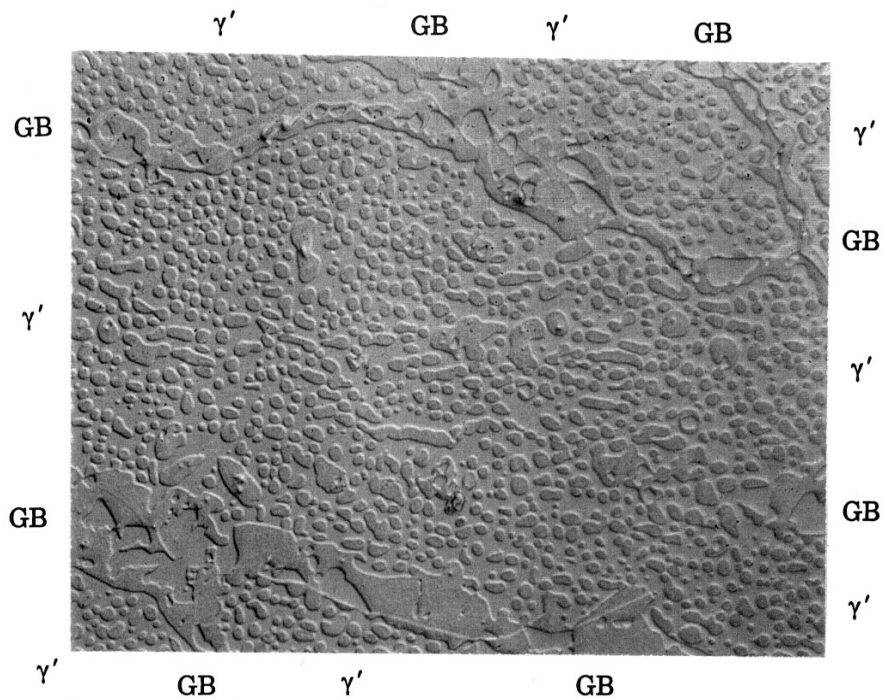
Termiskt relaterad nedbrytning av mikrostrukturen i baslegeringen leder till att de mekaniska egenskaperna försvagas, dvs. kryphållfasthet, krypduktilitet och TMF-hållfasthet. Exempel på dessa nedbrytningssätt är:

- Förgrovning av  $\gamma$ -strukturen i utskiljningshårdade legeringar
- Utskiljning av icke-önskvärda faser i legeringar

Denna nedbrytning förekommer vanligen i de hetare roterande delarna i skovlarna, vanligtvis i den fjärdedel av utloppskantsektionen som är högst belägen. Ifall ingen betydande utarmning av elementen i baslegeringen inträffat kan de mekaniska egenskaperna återställas i nästan ursprungligt standardskick med ändamålsenliga värmebehandlingsmetoder.

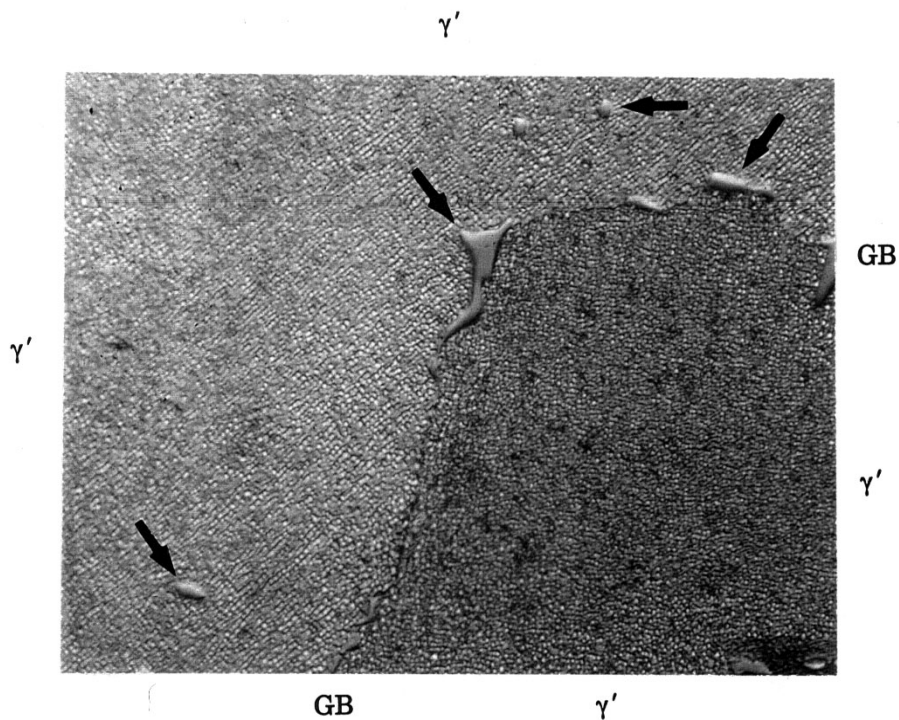
Effekten av långvarig drift vid hög temperatur kan observeras när man jämför strukturen av  $\gamma$ -utskiljningarna i Figureerna 2.3.2-9 och 2.3.2-10.





Figur 2.3.2-9. Skovelmaterialets mikrostruktur i den heta utloppskantsektionen vid en höjd av 90 % av skoveln. Observera den åldrade morfologin av den härdande  $\gamma'$ -strukturen. 1000 X.

Figure 2.3.2-9. Blade material microstructure in the hot trailing edge area at 90 % height of the airfoil. Note the overaged morphology of the strengthening gamma prime structure. 1000X.



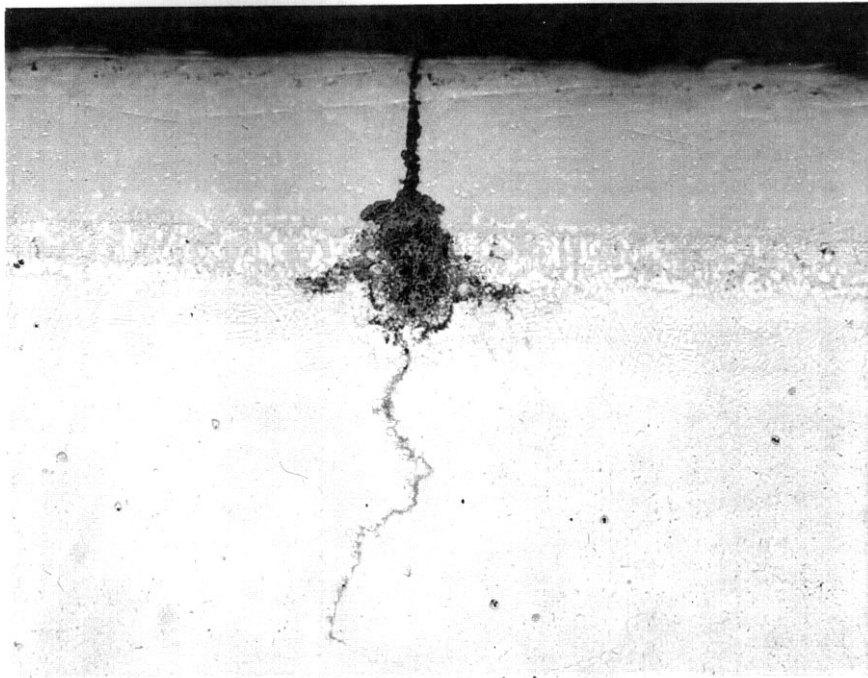
Figur 2.3.2-10. Skovelmaterialets mikrostruktur i skovelhalsen? (skovelns kylningsområde). Observera den ringa åldrade morfologin hos den härdande  $\gamma'$ -strukturen. 1000X.

Figure 2.3-2-10. Blade material microstructure in the blade shank (cool area of the blade). Note the little aged morphology of the strengthening gamma prime structure. 1000X.

*TMF-relaterad sprickbildning*

En TMF-skada är ett stort problem för de roterande skovlarna i första steget i anläggningar med frekvent cyklisk drift, även om sådana skador är mindre vanliga än i första stegets ledskenor. Till exempel utsätts inloppskanten för en hög dragpåkänning under nedkörningen. Spänningstoppen är ännu högre vid en nödavställning, när anläggningen stoppas vid full last på en mycket kort tid. Ytbeläggningarna som används på skovlarna är vanligtvis relativt spröda och är utsatta för sprickbildning vid relativt låga spänningsnivåer. Beroende på ytbeläggningstypen och distributionen av spänning på skovlarna under en transient kan sprickor i ytbeläggningen börja bildas redan efter ett fåtal driftcykler. Dagens ytbeläggningssystem i flera skikt är planerade för att stoppa dessa fina sprickor i skikten mellan gränsytorna samt för att förhindra att de sprids till komponentens baslegering. I exceptionella fall kan sprickorna dock fortplanta sig fram till basmaterialet och förorsaka en permanent irreparabel skada. Den ofördelaktiga miljön i turbinens heta gasflöde kommer därefter att nå den oskyddade spetsen av sprickan och förorsaka oxidering. Denna typ av skada är i normala fall begränsad till anläggningar med starkt cyklisk drift eller vars ytbeläggningar inte är optimala.

Figur 2.3.2-11 visar en typisk TMF-spricka med oxiderad sprickspets som sträcker sig genom ytbeläggningen och in i baslegeringen.



**Figur 2.3.2-11.** En TMF-spricka genom ytbeläggningen med sprickspetsoxidering som sträcker sig ned till skovelns baslegering.

**Figure 2.3.2-11.** Although-coating TMF-crack with tip oxidation extending into the blade base alloy.

*Krypdeformation och krypskada*

På grund av den höga centrifugalbelastningen har de roterande skovlarna i en gasturbin en begränsad kryplivslängd. Under normala förhållanden är skovelns utsatt

för övergripande töjning med några mindre lokala områden med större töjningar. Ifall skovelkonstruktionen uppvisar några konstruktionsfel - även mindre sådana - kan dessa lokala områden med stor töjning begränsa livslängden eller underhållsintervallen.

I polykristallina skovellegeringar upptäcks krypskada först som krypkaviteter i korngränserna i områden med hög belastning. Ifall kavitetsbildningen inte är omfattande kan skoveln återställas genom het isostatisk pressning (HIP) och därpå följande värmebehandling, varvid de önskade mekaniska egenskaperna och mikrostrukturen återställs. Krypskadan kan även utvecklas till bildning av mikrosprickor och makrosprickor. Sådana skador anses allmänt vara omöjlig att reparera.

I legeringar med riktat stelrande (DS) och i enkristallegeringar (SC) är det mer sannolikt att kryptöjningen fortgår utan kavitetsbildning och sprickbildning ända till helt nära slutbrottet.

I exceptionella fall kan krypning leda till en struktur där de enskilda kornen i materialet är starkt deformerade och förlängda. Detta är ett tecken på snabb krypdeformation jämfört med den vanliga förväntade kryptöjningshastigheten (mindre än  $10^{-5}$ - $10^{-6}$  1/h).

#### 2.3.2.5.2 Provning av skovlar

De vanligaste provningsmetoderna är oförstörande, eftersom de oftast är snabbare att utföra och kostar mindre än förstörande provningsmetoder. Förstörande provning kräver åtminstone några reservdelar och demontering av gasturbinen.

Boroskop- (endoskop-) inspektioner av skovlarna på åtkomliga steg kan göras utan att turbinen öppnas för att komma åt de steg som skall undersökas. I jämförelse med stationära ledskenor kan boroskopinspektion av roterande skovlar vara mer omfattande eftersom rotern kan roteras och alla skovlar i samma steg kan då inspekteras med samma åtkomlighet. I övrigt är in situ-provning i de flesta fallen begränsade till okulär provning eller penetrantprovning med fluorescerande färger. Dessa metoder är även de vanligaste i reparationsverkstäder. De allmänna ytbeläggningsförhållandena kan bedömas okulärt och ett stereomikroskop kan användas för mer detaljerade observationer av skovelytan. Potentiell sprickbildning på skovlar och ledskenor bedöms med penetrantprovning.

I syfte att upptäcka potentiell inre sprickbildning och blockerade kylningskanaler kan röntgeninspektion användas. Virvelström- och ultraljudsprovning kan användas för spricksökning, i vissa fall för sprickstorleksbedömning och för att mäta tjockleken av ytbeläggningar. Dessa metoder används för närvarande mer i reparationsverkstäder än in situ.

Det enda säkra sättet att bedöma ytbeläggningens kondition och mikrostrukturen i baslegeringen av en skovel är en förstörande metallografisk bedömning som utförs av ett sakkunnigt laboratorium. Förstörande provning är begränsad dock till en eller ytterst få skovlar (i normala fall en turbinskoovel av en uppsättning på 40-100 skovlar i samma steg), och detta kan göra att de observationer som kan göras inte är helt representativa. Oförstörande provning kan däremot genomföras snabbare och över större områden, även om resultaten av dessa metoder i allmänhet inte är lika detaljerade, speciellt i fråga om det inre i materialet.

#### 2.3.2.5.2 Återstående livslängd hos skovlar

Liksom för andra högtemperaturkomponenter i gasturbiner är rutinerna för hantering av livslängden hos roterande skovlar ägnade att återställa konditionen i tillräcklig utsträckning för att säkerställa följande driftperiod. Av denna orsak ger resultaten av skovelinspektionen den viktigaste informationen om nödvändiga reparationer och utbyten.

I allmänhet kan sprickbildning eller annan omfattande skada inte tillåtas i skovelområden med höga spänningar vilka sträcker sig till en höjd på cirka två tredjedelar av skoveln från roten. Skovlarnas toppområden, skoveltak och övre tätningar kan repareras genom svetsning, hårdlödning, maskinbearbetning till korrekta dimensioner, nybeläggning och värmebehandling så att skovlarna blir återställda. Reparationsgränserna fastställs beroende på skadans omfattning, strukturella egenskaper och materialen i fråga. Under de senaste åren har en betydande utveckling av reparationsmetoderna skett som syftat till att utöka reparationsmöjligheter för skovlarna.

Krypdeformation på en skovel kan tolereras till en viss omfattning som kan begränsas till ca 1 % töjning, vridning som påtagligt reducerar den aerodynamiska prestationsförmågan eller skovelspetskontakt mot turbinhuset.

Nedbrytning av den skyddande metalliska ytbeläggningen bör inte avancera så långt att halten av de skyddande oxidbildande elementen (främst Al) sjunker under ett kritiskt värde så att ytbeläggningen förlorar sin skyddande funktion under nästa driftperiod. Sprickbildning i sådana ytbeläggningar bör inte avancera till baslegeringen under nästa driftperiod. Keramiska ytbeläggningar med ett termiskt barriärskikt (TBC) borde vara oskadade och vidhäftande, utan något märkbart oxidskikt mellan TBC och bindningsskiktet. Omfattande inre oxidering eller utarmning av härdningsfasen ( $\gamma$ ) i baslegeringen är ett tecken på att ytbeläggningen förlorat sin skyddande förmåga. Diffusionsskiktets tjocklek mellan ytbeläggningen och baslegeringen kan även indikera den termiska historien under drift. Tecken på överhettning, stark extern oxidering eller högtemperaturkorrosion kan kräva reparationsåtgärder i syfte att sänka de lokala temperaturerna eller minska annan miljöbelastning snarare än enbart reparation eller utbyte av komponenterna i fråga.

För de flesta typer av skada finns det vanligtvis speciella rekommendationer för maskiner och komponenter som fastställer om dessa kan accepteras för fortsatt drift. Likaså finns även gränser fastställda för i vilka fall olika komponenter kan repareras. Komponentens livslängd fram till nästa reparation eller utbyte definieras normalt av en eller högst ett fåtal skademekanismer åt gången och måste bedömas på nytt efter varje driftperiod. Skademekanismerna måste fastställas tydligt för att ändamålsenliga livslängdskriterier ska kunna tas fram.

Flera av de livslängdsbegränsande skademekanismerna är relativt starkt temperaturberoende med en allt större inverkan med stigande temperatur. Detta gör att temperaturgränser är speciellt viktiga för livslängdshantering. faktiska drifttemperaturen som komponenterna utsätts för kan ofta bedömas utifrån materialets kondition vid detaljerad inspektion av materialet.



### 2.3.2.6 Turbinskivor

#### Allmänna egenskaper

Turbinskivor är de element på rotorn där den roterande kompressorn och turbinskovlarna är fästade. Skivorna är inte utsatta för de högsta temperaturerna från gasflödet, även då de hetaste turbinsektionerna inräknas, men de är mekaniskt högt belastade. Som roterande tunga element är skivorna utsatta för både stationär centrifugalbelastning och cyklisk (utmattnings-) belastning från lokal obalans och vibrationer som är betydande.

Skivbrott skulle med stor sannolikhet leda till att gasturbinen förstörs totalt och kunde också utgöra en risk för personal och annan utrustning i närheten. Landbaserade gasturbiner kan kräva starkare och mera skyddande hus än motorer avsedda för flygplan, men trots allt är ett skivbrott en händelse som är ytterst oönskat.

Vissa gasturbiner, i synnerhet flygplansmaskiner och andra små gasturbiner, har i allt större utsträckning använt skovelförsedda skivor, där skivan och dess beskovling är tillverkade som en enda enhet. Skovelförsedda skivor är vanligare på kompressorsidan än på turbinsidan i gasturbiner, men till exempel genom pulvermetallurgisk tillverkning är det möjligt att använda dem också på turbinsidan.

#### Material

På kompressorsidan där rotortemperaturerna är relativt låga kan stålskivor i likhet med sådana som används i ångturbiner utan större svårighet även användas i många landbaserade gasturbiner. På turbinsidan kräver dock kombinationen av temperaturer (upp till 500-700 °C) och hög driftspänning starkare legeringar. De vanligaste materialen för turbinsidan är vissa smidda eller pulvermetallurgiska nickelbaserade superlegeringar, bland vilka den överlägset vanligaste typen är den nickelbaserade legeringen IN 718.

Sammansättningen av vissa skivmaterial i gasturbiner presenteras i Tabell 2.3.2-5.

**Tabell 2.3.2-5. Nominell sammansättning (vikt-%) av skivlegeringar (Stoloff 1987).**

| Material  | Cr | Ni  | Co   | Fe   | Mo  | W   | Ta | Nb  | Al  | Ti  | C    | B     | Zr   |
|-----------|----|-----|------|------|-----|-----|----|-----|-----|-----|------|-------|------|
| A-286     | 15 | 26  | -    | 54   | 1,3 | -   | -  | -   | 0,2 | 2   | 0,05 | 0,015 | -    |
| N-155     | 21 | 20  | 20   | 30   | 3   | 2,5 | -  | 1   | -   | -   | 0,15 | -     | -    |
| IN 718    | 19 | bal | -    | 18,5 | 3   | -   | -  | 5,1 | 0,5 | 0,9 | 0,04 | -     | -    |
| Udimet720 | 18 | bal | 14,7 | -    | 3   | 1,3 | -  | -   | 2,5 | 5   | 0,03 | 0,033 | 0,03 |

Pulvermetallurgisk (P/M) och/eller smidesbaserad tillverkning syftar till att minska risken för defekter som kan leda till utmattningssprickor i skivorna. Skivmaterialet anpassas vanligen mot vad som krävs för den position skivan har i turbinen genom att gradvis använda legeringar med allt bättre temperaturegenskaper mot gasturbinernas hetaste områden. En annan orsak till att använda nickelbaslegeringar i turbinskivor är att värmeutvidgningen i dessa är kompatibel med skovlarna som vanligen är nickelbaslegerade.

#### 2.3.2.6.1 Skador i turbinskivor

Skador på skivorna är ofta föranledda av utmattning, dvs. materialet reagerar på varierande eller cyklisk belastning. Initiering av utmattningssprickor härrör vanligtvis från tillverkningsfel och inneslutningar i materialet och förekommer i synnerhet i de högt spänningsbelastade regionerna av skivytorna och i spänningskoncentrationer såsom vid skovelfästena. Spänningsnivåerna tenderar att vara högst i de mellersta regionerna och vid skovelfästena, men de sist nämnda utsätts för de högsta lokala temperaturerna.

De livslängdsbegränsande materialegenskaperna är en kombination av känslighet för sprickinitiering, sprickpropagering och seghet. För ett material av god kvalitet ligger en relativt stor del av skivans livslängd under tidsperioden till sprickinitiering. Denna tidsperiod kan variera i längd, men den kan vara lika med noll, dvs. sprickor börjar propagera genast, ifall komponenten har grundläggande tillverknings- eller materialfel.

#### 2.3.2.6.2 Provning av turbinskivor

Provning av turbinskivor genomförs främst med hjälp av penetrantprovning med fluorescerande färger (FPI, PT), eller i fråga om ferromagnetiska skivmaterial med magnetpulverprovning (MPI, MT).

Med dessa provningsmetoder kan endast ytbrytande fel upptäckas (för MT kan även vissa fel strax under ytan upptäckas). Utmattningssprickor kan dock i de flesta fall förväntas vara ytbrytande och kunna upptäckas med PT eller MT. Skador som är mindre än en millimeter kan i allmänhet inte fastställas tillförlitligt. Detta ställer upp gränser för både de tillåtna inspektionsintervallen och konstruktionen.

För inre tillverkningsfel används röntgenprovning, virvelströmsprovning och ultraljudprovning, om än i mindre utsträckning i fråga om rutinunderhåll än i tillverkningsstadiet. Inspektionsmetoderna med virvelström (ET) och ultraljud (UT) kan även upptäcka små fel i millimeterstorlek.

Den kritiska sprickstorleken som leder till ett katastrofalt snabbt brott är beroende av den lokala spänningsnivån och segheten hos skivmaterialet. Ur provningsperspektiv är det dock nödvändigt att upptäcka defekter innan de genom utmattning når den kritiska storleken vid följande drift- och besiktningsintervall.

#### 2.3.2.6.3 Återstående livslängd hos turbinskivor

Vid bedömning av gasturbinskivors livslängd är det för det mesta fråga om utmattningsaspekter. Skivorna inspekteras i praktiken med avseende på tillverkningsfel och utmattningssprickor. Ifall sådana fel upptäcks som överskrider toleransen som fastställts i konstruktionen i de kritiska, högt spänningsbelastade områdena, byts skivorna i fråga vanligtvis ut eftersom ett skivbrott med stor sannolikhet har allvarliga följder. Detta gäller även för skovelförsedda skivor.

En bedömning av den tekniska livslängden är därför oftast begränsad till att specificera godtagbara gränsvärden eller kriterier för provning under tillverkningen och för inspektionsintervallen i syfte att säkerställa att befintliga fel under drift inte utvecklas till en oacceptabel nivå före följande inspektion.

**REFERENSER**

- Bathie W.W. 1996. Fundamentals of Gas Turbines, John Wiley & Sons, New York, p. 453.
- Erickson G. L. 1990. Polycrystalline cast super alloys, In Metals Handbook Vol 1, ASM International, OH, p. 981-994.
- Farmer R. 2000. 1999–2000 Performance Specs, Gas Turbine World Vol 19, p. 9-20.
- Stoloff N.S. & Hage, W.C. 1987. Superalloys II, John Wiley & Sons, p. 575-597.
- Stoloff N.S. 1990. Wrought and P/M superalloys, In Metals Handbook Vol 1, ASM International, OH, p. 950-980.



### 2.3.3 GENERATORER

#### 2.3.3.1 Allmänt om generatorer

Generatorer ansträngs nuförtiden allt mer av ökat effektbehov och ett stort antal uppstarter. Denna extra ansträngning leder utan tvekan till att generatorernas livslängd förkortas. Livslängdskontroll utförs regelbundet i form av täckande konditions-mätningar och systematiska översyner. Gamla generatorer moderniseras ofta för att passa moderna krav. Exempel på moderniseringsåtgärder är utbyte av lindning och introduktion av moderna isolersystem samt byte av kapselringar.

En konsekvens av den globala avregleringen av energimarknaden är att produktionspolicyn har förändrats i och med att energiproduktionen numera till allt mindre del statligt styrd. Kraftbörser har grundats, energibolag har privatiserats och energiproduktionen kontrolleras i dag strikt av elmarknaden beroende på inbördes bränslepris. Dessa fenomen i kombination med den oerhörda tillväxten i energiförbrukning samt introduktionen av vindkraft har utan tvekan föranlett större belastning av kraftverken i form av ett stort antal uppstartningar och ökat behov av topplast.

De förändrade driftsätten ställer högre krav även på nya generatorer, vilket kräver bättre dimensioneringsverktyg samt utveckling av material och konstruktioner. Nya material gör det möjligt att förbättra generatorns effektivitet utan att generatorstorleken ökar; den största generatoren på marknaden 1999 är ca 1,5 GVA. I och med att generatorernas värmetalighet blivit bättre, är generatortillverkarna inställda på att förbättra ventilationen med enklare och billigare metoder, t.ex. luftkylning; den största luftkylda maskinen på marknaden 1999 är 300 MVA. I takt med materialförbättringen har även magnetiseringsutrustningen förbättrats genom att magnetiseringsmaskinerna småningom ersatts av borstlösa roterande diodbryggor.

Generatorns livslängd kan förlängas och till och med flerfaldigas med konditionsövervakning, systematisk service och moderniseringar. Man har t.ex. konstaterat att regelbundna högspänningsprov på lindningsisoleringen kan förbättra tillgängligheten då ett planerat underhåll kan genomföras; svaga och felaktiga stavar upptäcks och kan avlägsnas i tid. Problem i anslutning till åldring måste sålunda lösas med hjälp av erfarenhet från fältet. Den globala erfarenheten av kraftverksproblem finns sammanställda i internationella organisationers rapporter. Slutsatserna i fråga om service, konditionsunderhåll och planering dras utifrån erfarenhet.

#### *Livslängd och åldring*

En generators livslängd påverkas av på varandra följande slumpmässiga processer som uppträder med en viss statistisk distribution – oftast med en Weibull- eller en normalfördelning.

Något entydigt orsakssamband mellan belastning och åldring kan inte fastställas eftersom åldring inte är en process som alltid kan förutbestämmas. Detta innebär att samma förhållanden och belastning inte nödvändigtvis leder till samma livslängd hos likadana apparater och anläggningar. Åldring självt är en serie av oåterkalleliga förändringar som småningom försämrar isoleringsegenskaperna.

Den faktor som mest påverkar generatorns livslängd är lindningsisoleringens kondition. Isoleringen åldras av den belastning generatorn utsätts för under drift. Faktorer som främjar åldring är:

- Temperatur och temperaturförändringar (värmemekanisk belastning)
- Elektriskt fält
- Mekanisk belastning
- Förhållanden i omgivningen, speciellt fukt
- Ämnen med kemisk inverkan, ozon etc.
- Joniserande strålning (maskiner i kärnkraftverk)

Generatorns belastning kan indelas i belastning på rotorn och belastning på statorn. Rotorn inklusive lindningen åldras huvudsakligen till följd av mekanisk belastning, medan statorn och speciellt lindningsisoleringen åldras till följd av elektrisk och kemisk belastning, men även här finns en mekanisk påverkan.

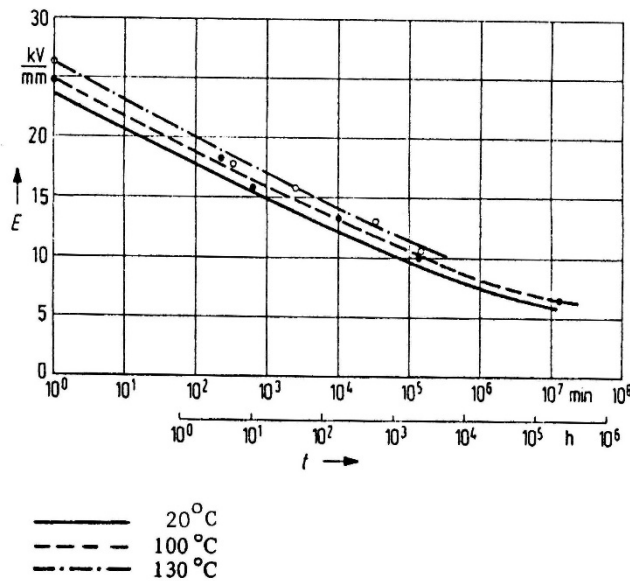
Utöver åldringsbelastning utsätts generatorn då och då för abnorma händelser, som påverkar generatorns totala kondition. Exempel på sådan belastning är:

- Överspänningar
- Plötslig väta
- Mekaniska slag, t.ex. elektrodynamiska krafter under uppstartning och i snabbkopplingssituationer
- Annan mekanisk belastning
- Övergående överhettning

Forskning i olika skademekanismer är mycket dyr och tidskrävande, eftersom många åldringssymptom uppträder först efter flera års drift. Problemet blir ännu mer komplicerat av att olika åldringsfaktorer liksom åldring självt kan bero på andra åldringsfaktorer, faktorer i omgivningen eller resultat av åldring. Detta kallas "kombinerad åldring" (multi-factor ageing).

#### *Termisk åldring*

Termisk åldring består av en grupp kemiska (ibland även fysiska) förändringar. Eftersom oxideringsreaktioner förorsakade av syre och hydrolysreaktioner förorsakade av vatten alltid ingår i de kemiska reaktionerna måste de betraktas som en del av åldring.



Figur 2.3.3-1. Temperaturens inverkan på en epoxyhartsisoleringens typiska livslängd. Epoxyhartssets spänningstålighet uppvisar en exceptionell ökning med ökad temperatur.

Figure 2.3.3-1. The effect of temperature to the typical life span curve of epoxy resin insulation. Voltage endurance of epoxy resin increases exceptionally, as the temperature rises.

Varje reaktion beskrivs av reaktionssnabbhetskoefficienten  $A_i$  och aktiveringsenergin  $E_i$ , där  $i$  är reaktionens karakteristiska antal. Reaktionens temperaturberoende är i enlighet med Arrhenius lag

$$k_i = A_i e^{\left(\frac{-E_i}{kT}\right)}$$

Antalet reaktioner  $i_{\max}$  kan vara relativt stort; därför är termisk åldring redan i sig ett mycket komplicerat fenomen.

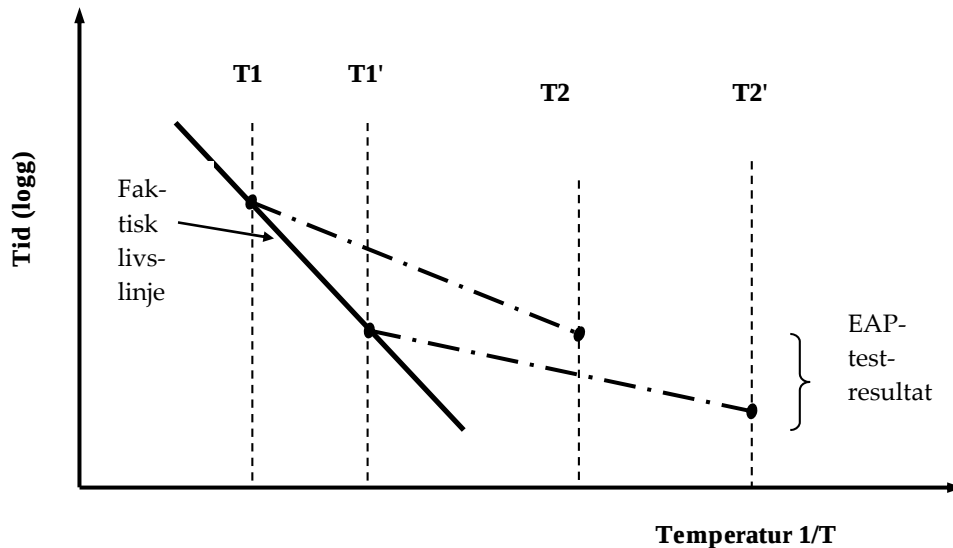
Termisk åldring kan beskrivas med tre reaktioner:

- Den termiska reaktionen, där koncentrationsförändringen i reagens är direkt proportionell till koncentrationen av själva ämnet.
- Oxideringsreaktionen, där koncentrationsförändringen även beror på syrekoncentrationen; syre löses i någon mån i alla ämnen.
- Hydrolysreaktionen, där mediet är vatten i stället för syre.

De ovan nämnda reaktionerna bestämmer med stor sannolikhet åldringsprocessens framskridande.

Termisk åldring har studerats med accelererade åldringstest, dvs. genom ökade testtemperaturer. Testresultaten extrapoleras därefter till drifttemperaturområdet. Härvid antas att en av åldringsreaktionerna är dominant så att den linjära extrapoleringen i Arrhenius koordinater är gällande. Det bör noggrant övervägas i samband med extrapoleringen hur långt temperatur- och tidsextrapoleringen görs för att uppskattningen av livslängden inte skulle vara för osäker.

Åldringstest utförs så att viktiga ämnens värden bestäms efter lämpligt långa åldringsperioder. Livslängden har uppnåtts när den aktuella egenskapens värde blir sämre än det överenskomna gränsvärdet (livslängdskriterium, life span criteria).



Figur 2.3.3-2. Extrapolering av reaktionshastigheten

Figure 2.3.3-2. The extrapolation of reaction rate

Extrapolering i relation till temperaturen går inte att genomföra om två eller flera av de termiska åldringsmekanismerna som nämnts ovan påverkar undersökningsföremålet.

Som vi kan se i Figur 2.3.3-2 kan de ömsesidiga relationerna mellan reaktionshastighetslinjerna ändras kraftigt även inom ett relativt litet temperaturområde. Detta är ett tecken på att åldringsprocessen ändras som en funktion av temperaturen och det inte finns någon teoretisk grund för antagandet att en försämring av fysiska egenskaper skulle följa några av de ovan nämnda reaktionshastighetslinjerna. Och även om det skulle vara fallet, är det inte bekant vilken av linjerna det skulle gälla.

Ifall flera påverkande reaktioner föreligger, tillämpas Paloniemis EAP-teori (equalised ageing process, balanserad åldringsprocess). Enligt denna teori är åldringsprocesserna i två olika temperaturer likadana, ifall hastigheterna hos alla åldringstemperaturer i givna temperaturer relaterar till varandra på liknande sätt.

En praktisk tillämpning av EAP-teorin kräver att alla kända reaktionshastigheter, även temperaturen, kan mätas. Teorin kräver också att de önskade syre- och fuktighetskoncentrationerna kan uppnås under de fysiska åldringstesten.

EAP-metoden är inte tillförlitlig om den testade isoleringen innefattar flera åldringssubstanser som åldras enligt olika reaktioner och samtidigt också påverkar varandras åldringsreaktioner. Ett undantag är epoxyglimmerisolering som endast består av oorganiska material (glimmer, glasfiber) förutom epoxyharts; därför bestäms kemisk åldring fullständigt av epoxyharts.

Termisk åldring hos ett isoleringssystem kan inte förutses tillförlitligt med separata, fristående åldringstest på isoleringarna. Åldringstestet används huvudsakligen för val av isoleringssystem för senare test. De tjänar också som grund för materialspecifikationer.

Isoleringssystem måste oftast testas på ett "gammalmodigt sätt" genom att allt kraftigare åldringstest utförs i förhöjd temperatur och resultaten extrapoleras till driftresultat i Arrhenius koordinater. Testet måste alltid utföras som ett jämförande test; dvs. ett nytt isoleringssystem livslängd jämförs med livslängden av ett referensisoleringssystem som visat sig vara hållbart. Om den nya isoleringen är bättre än referenssystemet över hela drifttemperaturområdet, kan den klassificeras enligt minst samma temperaturklass som referenssystemet.

Bland standardtestmetoder kräver det amerikanska "motorette"-testet (IEEE 117) speciellt omnämnande. Testet har varit i bruk över 30 år och det är utgångspunkten för en internationell standard (IEC 34-18-1, -21, -31). Också de termiska åldringstesten omfattas av en egen IEC-standard, IEC 216.

#### *Elektrisk åldring*

Den huvudsakliga orsaken till elektrisk åldring är partiella urladdningar. Testresultat föreligger dock, i synnerhet i samband med termiska åldringstest, som tyder på att enbart av närvaron av elektriska fält utan partiella urladdningar kan förorsaka åldring. Enkla teoretiska studier, som grundar sig på att aktiveringsenergin värde minskar till följd av ett elektriskt fält har inte gett resultat som motsvarar observationerna. Ifall elektrisk åldring uppträder utan partiella urladdningar är det ett resultat av andra faktorer med en starkare inverkan.

Elektrisk åldring förorsakat av partiella urladdningar är förknippat med ett flertal verkningsmetoder. Detta kan vara orsaken till att inga entydiga, klara åtgärder föreligger, med hjälp av vilka "faran" med partiella urladdningar kunde bedömas. Åtminstone följande verkningsmetoder bidrar entydigt till elektrisk åldring:

- Mekanisk nötning förorsakad av partiella urladdningar till följd av mekaniska och termiska effekter på isoleringens yta.
- Omedelbara effekter av partiella urladdningar på isoleringens yta: jonisering och radikal formning som förorsakar kemiska reaktioner.
- Laddningsbärare som har utvecklats (joniserats) eller injekterats i ämnet och transporteras djupare in i det.
- Partiella urladdningar förorsakar sekundära yturladdningar som i sin tur inverkar på ämnets ytlager.
- Indirekta kemiska effekter: Urladdningar framkallar kväveoxider och ozon i luften. När kväveoxiderna reagerar tillsammans med fukt uppkommer bl.a. salpetersyra. Dessutom kan syran reagera tillsammans med isoleringens organiska substanser och förorsaka nedbrytning. Ozon förorsakar att ämnet oxiderar.

För att dimensionera isoleringens livslängd görs accelererade åldringstest. Två accelerationssätt kan komma i fråga: att öka det elektriska fältets styrka eller att höja frekvensen. Följande beroendeförhållande gäller för livslängden i fråga om elektrisk åldring:

$$L = K \left( \frac{E}{E_0} \right)^{-n} \left( \frac{f_0}{f} \right)^m$$

där;

L = livslängd,

E = fältstyrka,

f = frekvens,

K = konstant.

Index 0 beskriver de nominella förhållandena.

Den ovan nämnda ekvationen är helt grundad på observationer; teoretiskt har denna eller andra ekvationer, som utgår från observationer, inte presenterats. Extrapolering utanför testresultatområdet är därför osäkert. För glimmerisolering är exponenten n stor, ofta 8-12, vilket tyder på att livslängden är kraftigt beroende av det elektriska fältets styrka. En ytterligare konsekvens av detta är att spridningen bland testresultaten är stor: förhållandet mellan maximi- och minimiresultat kan vara till och med 10:1 i en testserie.

Eftersom extrapoleringen av resultaten i driftförhållanden inte är noggrann på grund av stor spridning, måste stora säkerhetsfaktorer användas. Livslängdsfördelningen följer ofta den så kallade Weibull-distributionen. Exponenten m, som bestämmer beroendet av frekvensen, är till sitt värde ofta mindre än ett.

#### *Mekanisk åldring*

Mekanisk åldring är till sin natur besläktad med utmattning hos metaller. Utmattning hos stormolekylära polymerer påverkas även av kemiska reaktioner, eftersom brott i substanser på mikronivå kan innebära att också kemiska bindningar upplöses, vilket leder till formning av radikaler och nya reaktioner. Studier i dessa fenomen liksom studier i mekanisk åldring hos isoleringar är ännu inte väl utforskade.

Åldringstest kan accelereras antingen genom att belastningsnivån eller frekvensen höjs, men extrapolering av resultaten i driftförhållanden är ännu osäkrare än i fråga om elektrisk åldring, eftersom den motsvarande åldringsfunktionen inte är känd.

*Åldring föranledd av förhållanden i omgivningen*

De viktigaste av dessa mekanismer, oxidering och hydrolys, har redan behandlats i samband med termisk åldring. Andra omgivningsbetingade faktorer är

- fukt
- kemikalier
- kemiskt aggressiva gaser (industri)
- mekaniskt nötande förhållanden (t.ex. sand i kylluften) och
- joniserande strålning (maskiner i kärnkraftverk)

**Kombinerad åldring**

I kombinerad åldring har åtminstone två åldringsfaktorer en betydande inverkan på livslängden. Åldringsfaktorer med därpå följande åldring kan också inverka på andra åldringsfaktorer eller motsvarande åldring; vi har här sålunda att göra med interaktion mellan olika faktorer. Interaktionen kan påverka isoleringens livslängd och försvåra undersökningen av åldring. Åldring är aldrig summan av de bidragande faktorerna!

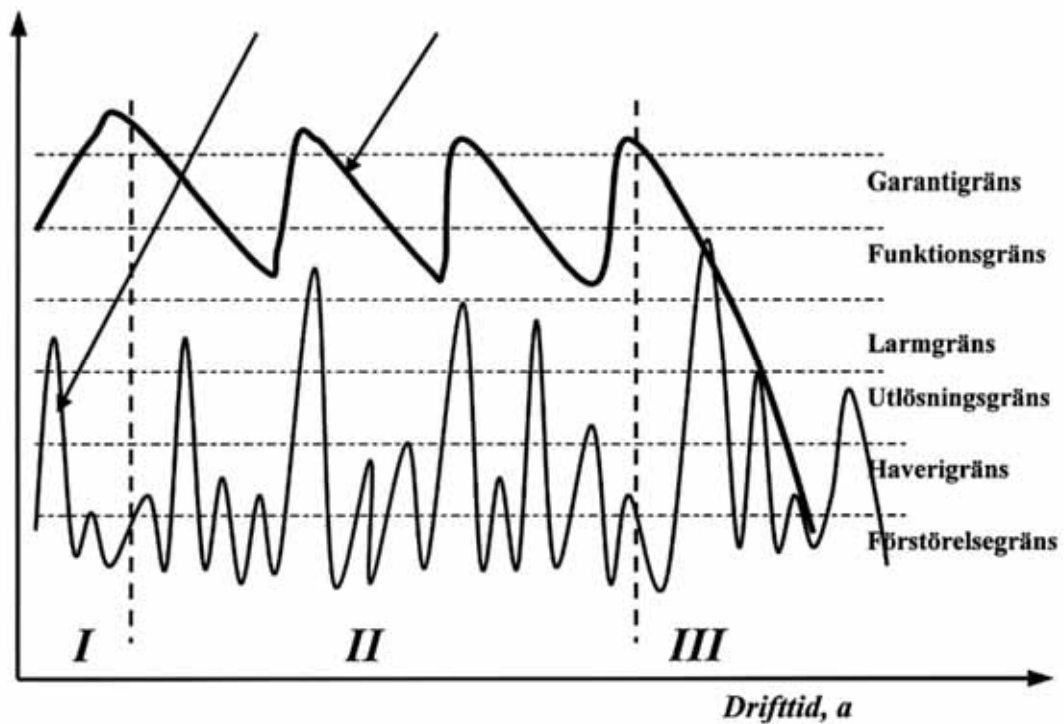
Exempel på kombinerad åldring:

- Naturen av elektrisk åldring förorsakad av ytströmmar är en typisk kombinerad åldringsprocess, som kräver samtidig närvaro av minst tre åldringsfaktorer: elektriskt fält över isoleringsytan, ledande material på ytan (t.ex. salt i havsklimat) och tillfällig fukt.
- Intensiteten av elektrisk åldring är vanligtvis beroende av temperaturen. En ökning i temperaturen kan antingen accelerera eller fördröja elektrisk åldring.
- Åldring förorsakad av joniserande ämnen är hos många material helt beroende av syretillgången och därmed också av termisk åldring.



*Konditionsgränser*

En generators livslängd består av tre sektorer, Figur 2.3.3-3.



**Figur 2.3.3-3** En generators konditionsgränser under dess livslängd  
**Figure 2.3.3-3.** Condition limits of generators during service life.

Generatoren är först (I) utsatt för fel som härrör från eventuella "barnsjukdomar" och felaktig dimensionering. Dessa fel kan elimineras under garantitiden. Under fas (II) kan närmast slumpmässiga fel uppträda, t.ex. till följd av överspänningstoppar, men generatorns kondition kan i det närmaste återställas fullständigt genom allmänna översyner (tre översyner med 10 års intervall). En viss gräns nås slutligen (III), när generatorns kondition plötsligt försämras i och med att flera komponenters livslängd nästan är slut. Felfrekvensen ökar och en gräns nås då generatorns drift inte längre är lönsam på grund av täta servicestopp.

En ny generator måste klara av garantigränserna som anges i inköpsavtalet. Gränserna verifieras i samband med drifttagningsprov och garantitest vars resultat senare används som utgångspunkt för konditionsmätningar. De angivna kraven är typiskt grundade på standarder och energi- och försäkringsbolags rekommendationer. Dessa rekommendationer är i sin tur utformade utifrån mättningsresultat och erfarenhet av generatorer.

I normala driftförhållanden ser styrnings- och regleringssystemen till att generatoren inte överskrider belastningsgränserna för normal drift. Generatoren är dimensionerad på ett sådant sätt att lindningsisoleringens livslängd är över 30 år i normal drift.

Avsikten med generatorns skydd är att ge och utlösa larm i generatoren i fall av störningar. Gränserna ställs vanligtvis in i samband med drifttagningen.

Att en larmgräns överskridits är ett tecken på begynnande konditionsförsämring eller en belastning med förkortning av livslängden som följd. En typisk källa till larm är att statorlindningen överhettats.

Om en utlösningssgräns överskrids är det ett tecken på en långt utvecklad skada eller en diagnostisk belastning. Utlösningssgränsen ställs in så att uppkomsten av skador förhindras eller begränsas så mycket som möjligt. T.ex. vid kortslutning i nätet kan generatorns ström överstiga överströmsgränsen, som ställts in så lågt att inga bestående deformationer uppkommer vid uppstartningen.

Det är att rekommendera att inspektionsmätningar görs så snart som möjligt efter allvarigare driftstörningar. Med dessa test säkerställer man att inga enskilda komponenters haverigräns överskridits. Ifall skyddsutrustningen inte fungerar eller helt saknas kan generatorns kondition brytas ned till haverigränsen, varvid åtminstone en eller flera komponenter måste bytas ut för att driften skall kunna fortsätta.

#### *Konditionsövervakning*

Ett av syftena med konditionsövervakning är att förhindra att generatorns kondition försämras så mycket att generatoren måste ställas av för att undvika att den skadas. Med regelbunden konditionsövervakning kan man bedöma hur generatorns kondition utvecklar sig och vilka serviceintervall som är lämpliga. Det måste dock framhållas att det inte finns några specifika mätningar eller anvisningar för att bedöma generatorns kondition. Detta beror på skadornas statistiska natur och ett flertal olika belastningsmekanismer som inverkar på generatoren.

Generatorns livslängd kan mångfaldigas med hjälp av konditionsövervakning, planerad service och modernisering. Man har till exempel lagt märke till att lindningsisoleringens livslängd faktiskt förlängts med hjälp av regelbunden högspänningsprovning, i och med att svaga och felaktiga stavar upptäcks och byts ut i tid.

Generatorns översynsintervall måste bedömas från fall till fall beroende på driftsättet. Intervallet bestäms av generatorns ekvivalenta drifttid.

$$T = T_B + n_s \cdot T_s$$

där

$T$  = ekvivalent drifttid,

$T_B$  = drifttid,

$n_s$  = antal uppstartningar, och

$T_s$  = beräknad drifttid för uppstartningarna.

Den beräknade drifttiden  $T_s$  för uppstartningar är vanligtvis 20 timmar. Generatorer kan indelas i fyra grupper enligt driftsättet, se Tabell 2.3.3-1.

**Tabell 2.3.3-1** Ekvivalenta drifttider för olika driftsätt.

| Driftsätt                           | $T_B$ [h] | $n_s$ [1/a] | $n_s T_s$ [h] | $T$ [h] |
|-------------------------------------|-----------|-------------|---------------|---------|
| Fortlöpande drift                   | 7 000     | 10          | 200           | 7 200   |
| Fortlöpande tidvis drift            | 4 000     | 100         | 2 000         | 6 000   |
| Topplastdrift: 1 uppstart per dag   | 2 000     | 300         | 6 000         | 8 000   |
| Topplastdrift: 2 uppstarter per dag | 1 000     | 500         | 1 0000        | 11 000  |

När intervallet mellan konditionsmätningar bedöms kan olika driftsätt beaktas med den ekvivalenta drifttiden enligt Tabell 2.3.3-1. Översynsintervallen grundas på normal användning av generatorm utan större störningar.

Tillförlitlig generator drift garanteras med regelbundet eller tillståndsbaserat underhåll. Underhållsintervallet beror på driftsättet. Den första servicen utförs efter 1-2 års drifttid. Efter detta görs service på följande sätt:

- Mindre översyn 1 - 2 år
- Regelbunden service 3 - 6 år
- Större översyn 8 - 12 år

Serviceprogrammet omfattar följande konditionsövervakningsobjekt:

- Diagnostisk provning av statorlindningsisoleringen
- Diagnostisk provning av rotorlindningsisoleringen
- Diagnostisk provning av plåtpaketsisoleringen
- Funktionsprovning av skyddsutrustningen
- Funktionsprovning av magnetiseringsmaskinen
- Funktionsprovning av synkroniseringen
- Diagnostiska inspektioner av statorstommen och plåtpaketet
- Diagnostiska inspektioner av rotorkropp, kilar och kapselringar
- Diagnostiska inspektioner av lagren och axeltätningarna
- Diagnostiska inspektioner av värmeväxlare och gaskylare

Fortumkoncernens rekommendation för konditionsövervakningsintervall samt en förteckning över konditionsmätningar framgår av Bilaga A.

#### *Bestämning av livslängden*

Bestämning av livslängden måste grunda sig på design, erfarenhet, och generatorns historik i form av exceptionella händelser och diagnostiska resultat. Dessa måste jämföras med konditionsmätningar på andra motsvarande generatorer och slutligen måste framtida drift identifieras.

Speciell försiktighet måste iaktas ifall de jämförda generatorerna är olika tillverkare eller om deras driftsätt skiljer sig från varandra. I praktiken grundar sig konditionsbedömning på rapporter utgivna av olika internationella organisationer, stora kraftbolag och generatortillverkare.

GE:s konditionsövervakningssystem för högspänningsmaskinisoleringar kan anses vara ett av de mest tillförlitliga systemen för bedömning av livslängd. Det är grundat på erfarenhet från konditionstövervakningsmätningar på mer än 500 maskiner.

Mätningarna väljs så att de kan användas under översyner för bedömning av isoleringens kondition i stor omfattning utan att isoleringarna skadas.

Resultaten av enskilda mätningar indelas i konditionsklasser (MR=1...10). Resultaten vägs med empiriska vägningsfaktorer (WF=1...3) som betonar vissa mätresultat, se Tabell 2.3.3-2.

**Tabell 2.3.3-2 Vägning av konditionsmätningar**

| Bedömningsobjekt<br>[MR]                                               | Vägningsfaktor [WF] |
|------------------------------------------------------------------------|---------------------|
| Isoleringsmotstånd ( $M\Omega \times \mu F$ )                          | 1                   |
| $\tan\delta_{0,2}$                                                     | 1                   |
| $\tan\delta_{1,0-0,2}$ ( $\tan\delta U_n - \tan\delta U_n \cdot 0,2$ ) | 2                   |
| $E_{0,6}$ (urladdningsenergi $U_n \cdot 0,6$ )                         | 3                   |
| $E_{1,0}$ (urladdningsenergi $U_n$ )                                   | 3                   |

Isoleringens övergripande konditionsklass erhålls från resultaten beräknade med vägningsfaktorer

$$OMR = \frac{\sum MR \times WF}{10}.$$

Den övergripande konditionsklassen, OMR, för en ny statorisolering är lägre än 3. Ifall OMR-värdet överstiger 6 eller 7 är risken för störningar stor. I GE:s rapport nämns som exempel ett fall där OMR var så hög som 8,4 och omlindning av statorn rekommenderades. Statorlindningen skadades efter några månader.

Detta konditionsbedömningssystem utgår ifrån att en generators livslängd i stor utsträckning beror på statorlindningens kondition; därför gäller systemet inte mekaniska skador. GE:s konditionsbedömningssystem presenteras i Bilaga B.

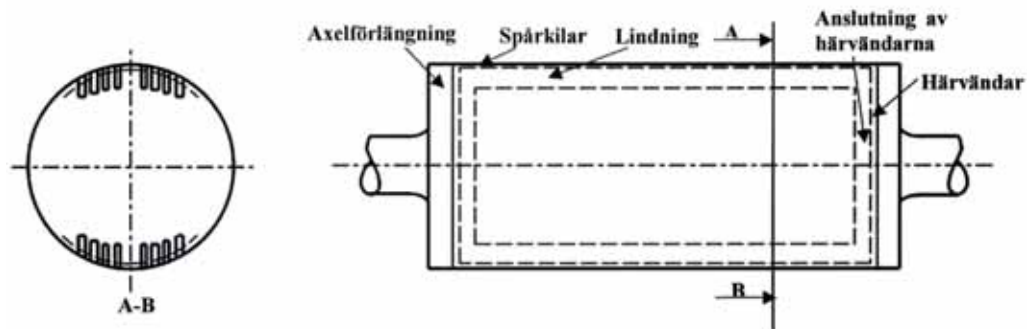
### 2.3.3.2 Rotorer

En generatorrotor är till sin konstruktion försedd med antingen utpräglad pol eller icke-utpräglad pol. Stora turbogeneratorer är alltid av icke-utpräglad poltyp, medan generatorer i vattenkraftverk och små turbogeneratorer är av utpräglad poltyp.

Rotorer av icke-utpräglad poltyp i generatorer kan indelas i två klasser:

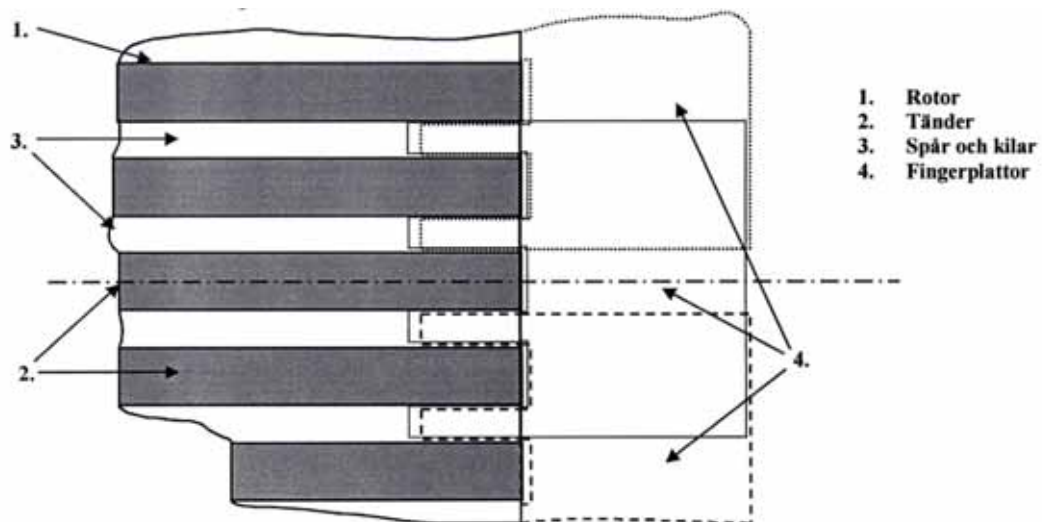
- Rotorer med parallella spår
- Rotorer med radiella spår

Som namnen anger är spåren i rotorerna med parallella spår bearbetade parallellt i navet och i rotorerna med radiella spår radiellt. Navet är gjort av massivt stål med hög permeabilitet. Spårslindningen är vanligtvis radiell, men vissa tillverkare har gjort rotorerna med parallella spår. Den största skillnaden mellan rotorerna med parallella och radiella spår märks i placeringen av härvändarna: i rotorerna med parallella spår är härvändarna placerade i navets spår, och i rotorerna med radiella spår är härvändarna dragna bredvid kapselringkonstruktionen. Figur 2.3.3-4 visar hur lindningsspåren konstruerats.



Figur 2.3.3-4 Lindningsspårkonstruktion i rotor med parallella spår  
Figure 2.3.3-4. Structure of winding slots in parallel slotted rotor.

Ibland utrustas tomma rotorspår med en så kallad fullständig dämplindning, som egentligen är en separat burlindning installerad mellan magnetiseringslindningarna. Ett annat alternativ är en ofullständig dämplindning, där det massiva navet tillsammans med kapselring, fingerplattor och kilar bildar en burlindning. En ofullständig dämplindning presenteras i Figur 2.3.3-5.



Figur 2.3.3-5 Ofullständig dämplindning.  
Figure 2.3.3-5. An incomplete damper winding.

Rotorlindningar stöttas av kilar. Kilarnas principiella funktion är att förhindra radiella och onormala axialrörelser hos lindningarna i spår. Radiella rörelser förorsakas av starka centrifugalkrafter. Onormal axialrörelse är i detta fall en följd av antingen stora termiska krafter eller liten icke-termisk expansion.

I en ofullständig dämplindning har kilarna också som uppgift att bilda en kanal till virvelströmmarna, vilket förutsätter elektriskt ledande spårkilsmaterial, vanligtvis en aluminiumförening. Generatortillverkare undersöker fortlöpande nya stöd- och isoleringsmaterial som tillåter ännu större termisk expansion hos kopparlindningar.

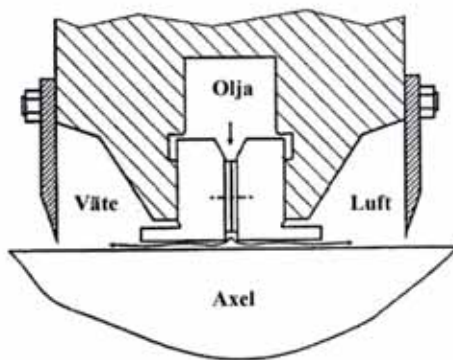
Rotorns lagersystem består av sköldar eller piedestaler. Vartdera systemet är allmänt använt och vardera har sina egna fördelar och nackdelar. Inbyggnadslager gör det lättare att transportera generatoren och minskar också generatorstorleken, vilket innebär att generatoren kräver betydligt mindre plats. Ifall sköldar används, är magnetiseringen vanligen borstlös med en likriktare med roterande diodbrygga.

Vid användning av inbyggnadslager finns det dock alltid en risk för att lagerolja läcker in i generatoren eller att vibrationer i statorns plåtpaket överförs via lagren till rotorn. Därför är lagerbockar ett säkrare, om än mer utrymmeskrävande, alternativ. Användning av piedestaler gör det också möjligt att utföra service på axeltätningarna utan att maskinen öppnas.

I luftkylda generatorer isoleras kylgasen med labyrinttätningar. I vätekylda generatorer isoleras vätet med axeltätningar (oljetätningar) som installeras i generatorns yttre mantel. Tätningarna befinner sig antingen direkt på axeln eller så är axeln utrustad med en separat stoppring.

Oljetätningarna är utrustade med två oljekamrar: en för tätningsolja och en för tryckolja. Högtrycksoljan i tryckoljekammaren pressar tätningsringen hårt mot axelns skuldra så att tätningsringen tvingas följa axelns rörelser mycket noggrant. Tätningsoljan i kammaren för tätningsolja bildar en tät hinna mellan axelns skuldra och tätningsringen som förhindrar att vätet läcker ut ur generatoren.

Oljekamrarna stängs hermetiskt med en O-ring av gummi placerad i lagerholkens ringformiga spår. Att olja läcker ut inne i generatoren hindras dessutom i den yttre manteln med hjälp av oljeringar och kamrar som samlar upp överskottsolja som droppar från lagren och axeltätningarna. För att förhindra vagabonderande ström är tätningsstommen och oljeringarna isolerade från den yttre manteln och oljerören. Figur 2.3.3-6 visar ett exempel på axeltätningar.



**Figur 2.3.3-6** Axeltätningarnas utformning i vätekylda generatorer.  
**Figure 2.3.3-6.** The structure of shaft seals in hydrogen-cooled generators.

De viktiga rotorkomponenter som påverkar generatorns livslängd är magnetiseringsströmgenomföringar, släpringar, lindningar, isoleringar, rotorkropp, kapselringar, fläktar och rotoruttagsdetaljer med isolering. Släpringarna och kolborstarna är tillförlitliga komponenter, men i svåra driftförhållanden kräver de daglig tillsyn. Den senaste trenden är att tillverkarna håller på att övergå till borstlös

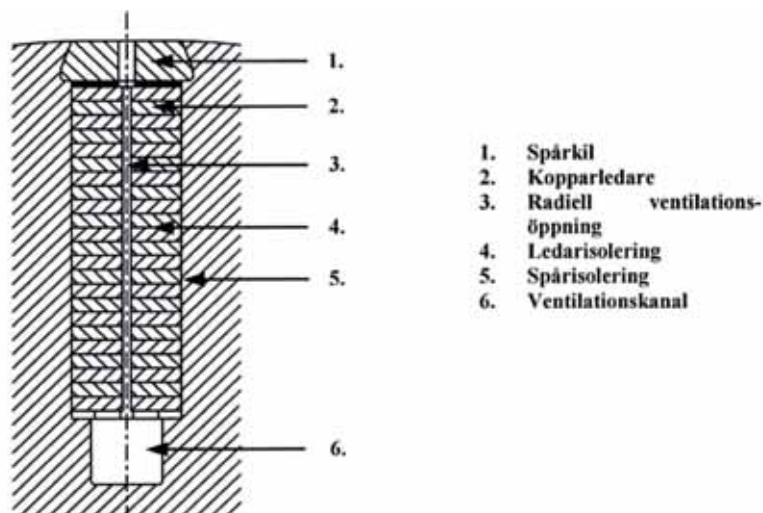
magnetisering, speciellt i de minsta enheterna. Borstlös magnetisering minskar behovet av underhåll och reparationer.

#### *Kylning av rotor*

En av hörnstenarna i generatorkonstruktion är kylningen. Forskningen på detta område är intensiv i dag, och varje generatortillverkare har olika egna kylmetoder. Målet med forskningen är att utveckla ett kylsystem som skulle kyla ned maskinen jämnt både i rotorspårerna och i härvändsområdena. Samtidigt är generatortillverkarna inställda på att frångå vatten- och vätgaskylda generatorer på grund av tätningsproblemen med dessa generatorer.

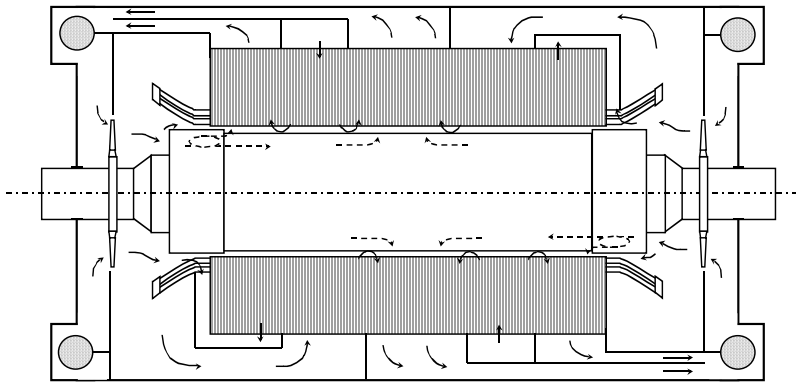
Maskinerna har traditionellt varit utrustade med indirekt kylning, varvid fläktvingarna på rotoraxeln har blåst kylmedel (luft eller väte) på rotorns yta. Resultaten av ett sådant kylsystem var otillfredsställande eftersom metoden ofta ledde till termisk skada på rotorlindningarna. Problemen var avsevärda i synnerhet inom härvändsområdet, där indirekt kylning kan vara svår att genomföra.

Indirekt kylning ändrades sedermera till direkt kylning, där kylgasen leds genom ventilationskanalerna direkt under rotorlindningen. På så sätt fungerar kylningsmekanismen allra effektivast i och med att den minskar temperaturstegringen i rotorlindningen i förhållande till navet. Ibland används ett separat kylningssystem, där luftströmmen genereras och leds med hjälp av separata fläktar. Fördelen med detta system är konstant kylningskapacitet även under underhållsstopp. Utformningen av ett rotorspår i en generator med direkt kylning är avbildad i Figur 2.3.3-7. Figur 2.3.3-8 visar ett exempel på kylmetoder för generatorm.



**Figur 2.3.3-7. Rotorspårstruktur i en generator med direkt kylning.**  
**Figure 2.3.3-7. The structure of a rotor slot in a directly cooled generator.**





**Figur 2.3.3-8. Kylsystem i en vätekyld 450 MVA generator.**

**Figure 2.3.3-8. Cooling system of a hydrogen-cooled 450 MVA generator.**

#### 2.3.3.2.1 Skador i rotorer

Generellt gäller att rotorkropp och övriga rotorkomponenter skall vara designade för den lastprofil som den utsätts för. Förändringar kan alltså medföra en situation som kan ge spricktillväxt i kritiska delar. Rotorn är speciellt utsatt för transienter såsom uppstarter och nätstörningar. Därför skall speciell uppmärksamhet fästas vid konstruktion och konditionsövervakning av topplastgeneratorer.

Andra faktorer som avsevärt förkortar rotorns och rotoraxelns livslängd är utöver övergångsförloppen böjning av axeln och vibrationer föranledda av magnetisk, mekanisk eller termisk obalans, som är mycket påfrestande för lagren. Då rotorn roterar samtidigt som obalans föreligger genereras en varierande böjkraft t.ex. på kapselringarnas krympförband, där det till följd av spänningskorrosion kan uppstå sprickor. Figur 2.3.3-9 ger ett starkt överdrivet exempel på hur navets vikt förorsakar att rotoraxeln böjs.



**Figur 2.3.3-9. Böjning av rotoraxeln.**

**Figure 2.3.3-9. Bending of a rotor shaft.**

Skevheter i lagren till följd av förvittring i lagerbockarnas gjutning eller vibrationsökning föranledd av uppriktningssändringar kan leda till mekanisk obalans i rotorn. I värsta fall kan dessa fel förorsaka att fläktarna rör vid bafflarna eller att kapselringarna går sönder.

Lager, fläktar, kolborstar och släpringar är komponenter som är utsatta för friktion och slitage även i normal användning. Dessa komponenter kräver regelbundet och systematiskt underhåll.

*Axelspänning och skada förorsakad av axelströmmar*

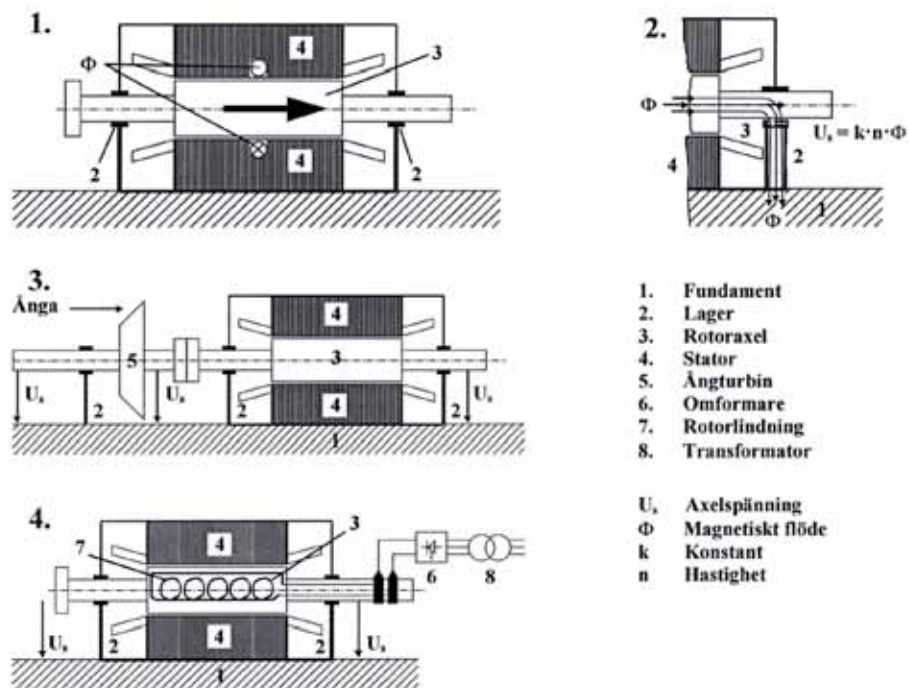
En generators magnetkrets (stator och rotor) är alltid osymmetrisk både mekaniskt och magnetiskt, vilket inducerar en spänning mellan axeländarna. Ett lager isoleras från statorstommen. Detta förhindrar cirkulation av axelströmmarna genom axeln och lagren. Om lagerisoleringarna skadas, kan den ström som uppkommer vara rätt så stor (flera tusen ampere). Stora strömmar genererar ljusbågar som skadar lagren och avnöter lager och lagergångar.

Axelspänningar kan indelas i fyra klasser utgående från deras uppkomstmekanismer enligt Tabell 2.3.3-3.

**Tabell 2.3.3-3 Axelspänningsklasser och skador förorsakade av respektive klass.**

| KÄLLA                                                                                                                                                                                                  | TRANSMISSION                                                                                                                                                     | SKADA                                                                                                                                                                                     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>1. Magnetisk osymmetri som beror på</b><br>- fogar i statorlaminaten<br>- excentricitet i rotorn<br>- vridning av rotor eller stator                                                                | Ett föränderligt magnetiskt flöde är sammankopplat med lager-kretsen mellan rotorns axel och fundament och inducerar en axelspänning.                            | Den inducerade spänningen förorsakar stora strömmar och därmed skada i de lågresistiva kretsarna pga. gnistbildning.                                                                      |
| <b>2. Axiella flöden som beror på</b><br>- återstående magnetisering<br>- rotoexcentricitet<br>- mätnad<br>- osymmetrisk rotorlindning                                                                 | Det roterande flödet inducerar enpoliga spänningar i lagren och delar av axeln.                                                                                  | De inducerade spänningarna förorsakar stora strömmar och därmed skada i lagren och axeltätningarna pga. gnistbildning.                                                                    |
| <b>3. Elektrostatisk laddning som beror på</b><br>- t.ex. skavning i ångturbinens skovlar                                                                                                              | Kapacitansen mellan jord och axel laddas, och axelns spänning höjs till det värde som den interna isoleringen tillåter.                                          | Spänningen mellan axeln och lagren (jorden) belastar oljemembranen. Ifall den skadas, uppkommer elektriskt genomslag och punktfrätning förorsakar skada på lagrens och tätningarnas ytor. |
| <b>4. Externa spänningar i rotorlindningarna som beror på</b><br>- statisk magnetiseringsutrustning<br>- spänningskälla och/eller osymmetri i lindnings-isoleringarna<br>- aktivt rotorlindningsskydd. | Externa spänningar höjer axelns potential till det värde som isoleringskapacitanserna och spänningskällans motstånd samt lindningen och axeln mot mark tillåter. |                                                                                                                                                                                           |

De två första spänningstyperna är induktiva till sin karaktär, medan de två följande genereras av elektrostatisk laddning. Källorna (punkt 1-4 i Tabell 2.3.3-3) till axelspänningarna illustreras i Figur 2.3.3-10.



Figur 2.3.3-10. Källorna till axelspänningar och strömmar  
Figure 2.3.3-10. The sources of shaft voltages and currents.

Induktiva spänningar förorsakar en ström i lågresistanskretsen som bildas av statorfundamentet, lagren och axeln. Till följd av denna ström värms lagren och axeltätningarna upp och kan leda till elektroerosion på lagerbussningarna och axeltätningarna. Man kan förhindra uppkomsten av en dylik ström med hjälp av en lämplig isolering vid generatorns magnetiseringsände.

Statisk laddning är en följd av t.ex. friktionselektricitet på turbinskovlarna eller osymmetri i tyristorlikriktaren. Spänningen över oljemembranen i axeltätningarna och lagren ökar med ökad laddning, vilket leder till elektrisk erosion. Statisk laddning avlägsnas med jordningsborstar som installeras mellan turbinen och generatoren. Spänningar som beror på det statiska magnetiseringssystemet elimineras med RC-kretsar som installeras mellan jord och axel, eller med symmetriska RC-filter som installeras på tyristorlikriktarens likströmsida.

Erfarenhet och laboratiemätningar utvisar att till och med en så låg högfrekvensspänning som 20 V kan förorsaka stora strömmar genom otillräckligt isolerade lager och axeltätningar. Axelspänning är ett avsevärt problem i generatorer med statiska magnetiseringssystem och bör därför beaktas i konstruktionen av stora turbogeneratorer. Nackdelarna med axelspänningar betonas i fråga om turbomaskiner med statisk magnetisering, eftersom den höga rotationshastigheten minskar jordningsborstarnas effekt.

Mätningar som utförts på generatorer med statisk magnetisering och icke jordade axlar har utvisat att en rektangulär spänning på 10...60 V uppträder över axeln. Sex 30 V högfrekventa spänningstoppar per cykel summeras upp utöver den rektangulära

spänningen. Trots jordning uppträder spänningstoppar i axlarnas magnetiseringsändar även i generatorer med jordade axlar.

#### *Skador på axeltätningar*

Fel i axeltätningarna förorsakas vanligtvis av någon skada på O-ringen, av variationer i oljetrycket, förstockning i oljeuppsamlaren eller av skråmor på tryckflänsens kontaktytor. Skråmor kan uppkomma av orenheter i oljan, elektrisk erosion (till följd av axelströmmar) eller störningar i oljetillförseln.

En vanlig följd av fel i axeltätningarna är att tätnings- eller kompressionsoljan börjar läcka inne i generatoren. Läckoljan dämpar lindningsisoleringen, vilket leder till att isoleringsmotståndet och genomslagståligheten minskar. Detta leder slutligen till att isoleringen och härvorna skadas. Felet kan kräva ett omedelbart och, i värsta fall, ett långt servicestopp under vilket generatoren måste torkas.

Små oljeläckage kräver inte nödvändigtvis att maskinen måste ställas av, utan rengöring kan ske i samband med nästa översyn. Under denna översyn skall generatorns inre delar rengöras noggrant med en ren trasa och kemiskt rengöringsmedel som rekommenderas av generatortillverkaren. Vid större oljeläckage måste man låta oljan avdunsta från generatoren så snabbt som möjligt.

#### 2.3.3.2.2 Provning av rotor

Mätningar på rotorn kan indelas i

- On line-mätningar
- Mätningar under översyn, off-line

#### *On line-mätningar*

On-line diagnostik för rotor

Tabell 2.3.3-4 Funktionsstörningar i generatoren och spänningskomponenter som motsvarar dessa.

| KÄLLA                                                 | AXELSPÄNNINGENS KARAKTERIS- TISKA<br>KOMPONENTER                |
|-------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|
| Statisk excentricitet hos rotor                       | Spänningskomponenter med grundfrekvens                          |
| Dynamisk excentricitet hos rotor                      | 2:a harmoniska komponenten                                      |
| Kortslutning mellan lindningsvarven i rotorlindningen | Komponenter med grundfrekvens, jämna harmoniska och likspänning |
| Negativ sekvensström                                  | 2:a harmoniska komponenten                                      |
| Mättnad hos statorns plåtpaket                        | 1:a harmoniska komponenten                                      |
| Elektrisk kontakt mellan axel och tätningar           | Asynkroniska stegspänningar                                     |
| Dålig kontakt hos jordningsborstarna                  | Oharmoniska spänningar                                          |
| Magnetisering av axeln                                | Likströmskomponenten                                            |
| Osymmetri i magnetiseringskretsen                     | 6:e harmoniska komponenten                                      |
| Stor jordkapacitans i magnetiseringskretsen           | Högfrekventa toppar                                             |

Med axelspänningsmätningar upptäcks för rotnors del obalans i rotn samt axelns och tätningarnas elektriska kontakter utgående från ökningen av vissa frekvenskomponenter. En kombinerad mätning av lager- och axelspänningen är det enda sättet att utreda lagerisoleringens kondition under drift, ifall det inte är fråga om en så kallad dubbelisolering. Med hjälp av mätning av axelspänningen får man dessutom reda på jordningsborstarnas kondition. Mätningen görs under drift med en separat mätningskolborste som mäter upp spänningen från axelns yta vid maskinens magnetiseringsända. Frekvensen befinner sig i allmänhet inom området 0 till 1000 Hz.

#### *Mätningar och inspektioner under översyn*

Under mindre översyner övervakas rotorlindningskilarnas spändhet och kondition genom okulära inspektioner. Härvändarna granskas med avseende på sprickor och brända områden förorsakade av övergångsströmmar mellan kilarna och kapselringen. Vid okulär inspektion undersöks dessutom härvändarnas kondition, lindnings- och spårisoleringens kondition, lindningsdeformeringar och eventuell förskjutning av lindningarna samt lindningsstöden.

Inspektion av spårlindningen och spårisoleringen förutsätter vanligtvis att kapselringarna öppnas. I samband med mindre översyner räcker det därför till att härvändarnas och isoleringarnas kondition och renhet granskas med endoskop genom ventilationskanalerna. I vissa modeller kan spårlindningarnas ventilationskanaler nås genom hålen i kapselringarna, vilket möjliggör okulär inspektion av eventuella igensättningar i kanalerna. Igensättningar kan förorsaka lokala heta punkter som smälter ned lindningsisoleringen.

Fläktvingarna inspekteras okulärt med avseende på sprickor föranledda av friktion, turbulens, vibration och centrifugalkrafter. Sprickor på kanten av fläktvingarna lokaliseras akustiskt genom avknackning, men funktionellt sett kritiska sprickor vid roten av vingarna måste lokaliseras med hjälp av penetrantprovning.

Lagrens kondition bedöms utifrån vitmetallödningen på lagerytan. Sprickor och skråmor på lagerytan granskas med hjälp av okulär penetrantprovning. Den okulära

inspektionen kompletteras med ultraljudsprovning, vid vilken kontakten mellan vitmetallen och lagerbussningen bestäms. Ifall en viss procentuell andel av vitmetallen lossat från bussningen måste vitmetallen lödas om.

Lagerisoleringens kondition bedöms genom en mätning av isoleringsmotståndet som kan göras i samband med installation av lagren. Om lagren är utrustade med dubbelisolering kan lagerisoleringen även inspekteras senare. Släpringarnas och genomföringarnas kondition utvärderas i samband med de elektriska mätningarna på rotorn.

Som vi redan nämnde i föregående kapitel är interna oljeläckage i generatoren ett tydligt hot mot lindningsisoleringarnas och hela generators funktion. För att förebygga uppkomsten av läckage borde axeltätningarna inspekteras och vid behov repareras vid varje del- och totalöversyn. I vätekylda generatorer kan fel i axeltätningarna diagnostiseras i grova drag utgående från en ökning i förbrukningen av väte.

I samband med mindre översyner där rotorn inte lyfts ut räcker det med enbart en okulär inspektion av axeltätningarna och spelen. I samband med del- och totalöversyner demonteras axeltätningarna samt rengörs och inspekteras vid behov med hjälp av penetrantprovning. Samtidigt mäts tätningens nötning och isoleringen byts ut. Sneda axeltätningar kan vid behov uppriktas med hjälp av slipning.

#### 2.3.3.2.3 Återstående livslängd hos rotor

De viktigaste åldringsmekanismerna hos en rotor är

- Mekanisk åldring, utmattnings
- Nätrelaterade händelser och
- Kombinerad åldring

En rotor är mekaniskt stark och dess uppskattade livslängd är mer än tio gånger längre än lindningarnas. Detta betyder att det är svårt eller nästan omöjligt att uppskatta rotorns livslängd. I praktiken grundar sig uppskattningen av livslängden på konditionsövervakning av lagren och trenderna vid mätning av vibrationer och axelspänning. Objekten för konditionsmätningar och inspektioner framgår av Bilaga A.

Den korrigerande åtgärden vid mekaniska förskjutningar är uppbalansering och vid omgivningsrelaterade skador normal service och reparation.

Livslängden hos rotor och rotormaterial behandlas ytterligare i **kapitel 2.3.1.2**.

Åldringsmekanismerna hos turbinrotorer kan generaliseras till rotor i olika generatorer.

#### 2.3.3.3 Rotorlindningar

Det ökade kraftbehovet har lett till att ledar- och isoleringsmaterial har utvecklats. I fråga om rotorlindningar var det viktigaste steget i utvecklingen av ledarmaterial i bruktagningen av silverlegerad koppar, som betydligt förbättrar rotorlindningarnas förmåga att tåla temperatur och mekanisk last.

## 2.3.3.3.1 Skador i rotorlindningar

Skador på ledare och förskjutning av lindningar sker som en följd av

- Termisk expansion
- Flytning
- Mekanisk belastning
- Belastning föranledd av förhållanden i omgivningen

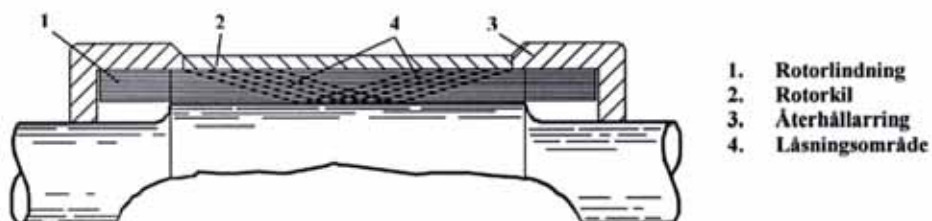
Den dimensionstekniska flaskhalsen hos generatorer bildas av ömsesidig termisk expansion mellan isolering, spår och ledare. Isoleringssystem av klass F drivs vanligtvis inom de termiska gränserna för isolering av klass B, vilket innebär en temperaturökning på 80 °C när den omgivande temperaturen är 40 °C maximalt. Den maximala temperaturökningen för en isolering av klass F är ungefär 120 °C.

Isoleringens temperaturgränser beror på mätsystemet, lindningarnas läge, kraften, strömformen etc. Temperaturgränser presenteras i omfattande utsträckning i standarden IEC 34-1. I Tabell 2.3.3-5 visas några av de mest typiska fallen av temperaturgränser för olika isoleringssystem.

**Tabell 2.3.3-5 Klassificering av isoleringen utgående från termisk beständighet.**

| DEFINITION                                                                                         | ISOLERINGSKLASS |     |     |     |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|-----|-----|-----|-----|
|                                                                                                    | A               | E   | B   | F   | H   |
| Max. temperatur [°C] i heta punkter.                                                               | 105             | 120 | 130 | 155 | 180 |
| Max. lindningstemperatur [°C] som bestämts enligt motståndsmätning.                                | 100             | 110 | 120 | 140 | 165 |
| Max. temperaturökning [°C] hos lindningen när den högsta kortfristiga rumstemperaturen är + 40 °C. | 60              | 70  | 80  | 100 | 125 |

I fråga om rotorlindningar är termisk expansion förknippad med centrifugalkraften i rotorns rotation. Rotationskrafterna "låser" lindningarna genom att pressa dem tätt mot kilarna. Friktionskrafterna förorsakade av denna sammanpressning förhindrar en normal termisk expansion i rotorlindningen, vilket förorsakar stor inre spänning i lindningen. Detta låsningsfenomen presenteras i Figur 2.3.3-11.



**Figur 2.3.3-11. Termisk expansion i rotorlindning samt låsningsområde.**  
**Figure 2.3.3-11. Thermal expansion of rotor winding and locking area.**



Termisk expansion förorsakar förutom spänning även axialkrafter som trycker kilarna, isoleringen och tätningen mot rotoränden. Det är sålunda möjligt att ventilationskanalerna i navet blockeras, vilket förorsakar heta punkter och isoleringsskada på lindningen. Det finns också en risk för att axialkrafterna skuffar på kilarna så att de kommer i kontakt med kapselringarna, vilket förorsakar övergångsströmmar mellan kilarna och ringarna.

Små rörelser är vanligtvis ofarliga och kan närmast förorsaka att stödklossarna mellan härvorna lossar. Stora rörelser leder till axialförskjutningar som till följd av att isoleringen lossar slutligen resulterar i kortslutningar mellan lindningsvarven som är svåra att upptäcka. En permanent expansion kan även föranleda jordfel.

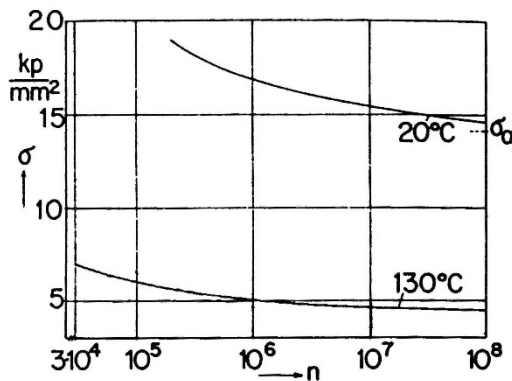
Flytning innebär deformation av ett ämne när dess sträckgräns överskrids. Flytning kan påverkas genom att silverhalten i kopparledarna ökas eller genom kallbearbetning. Med hjälp av dessa metoder kan sträckgränsen ungefär sexfaldigas. Drifttemperaturen har även en betydande effekt på sträckgränsen, eftersom koppars egenskaper i detta hänseende snabbt avtar kring 130 °C. Det bör dock framhållas att permanenta deformationer av ledarna inte är en följd av termisk expansion utan av otillräckliga hållfasthetsegenskaper hos materialet. Därför upphör rotorns härvändar efter en viss drifttid att töja, i och med att sträckgränsen hos materialet ökar till följd av töjning eller kallbearbetning.

Rotorlindningarna är under driften utsatta för radialkrafter och i transienter för tangentiella krafter. Som en följd av detta pressas lindningarna kraftigt mot rotorns tänder och kilar. Detta kan leda till att lindningsanslutningarna öppnas eller att lindningsisoleringarna eller spårändarna skadas.

Rotorhärvorna utsätts för stora elektromagnetiska krafter och centrifugalkrafter, som man försöker begränsa med hjälp av kilar och tätningar. De största krafterna kanaliseras dock till härvändsområdet där krafterna och strömmarna är speciellt betydande i transienter, t.ex. synkroniseringsfel, nätkoppling av avställd maskin eller kortslutningsimpulser. På grund av dessa krafter skyddas härvändarna noggrant mot tangentiella och radiala krafter med kapselringen.

Genomföringsskenorna utsätts liksom spårledningarna för belastning av centrifugal- och transientkrafter. Genomföringsskenorna och isoleringen är speciellt utsatta för slitage förorsakat av en skev rotor.

Rotorlindningarna belastas förutom av transientkrafterna även av magnetiska, dubbla frekvenser, som uppträder också under normal drift. En konstant belastning och förhöjd temperatur försvagar böjutmattningshållfastheten hos materialet, vilket framgår av Wöhlerkurvan i Figur 2.3.3-12.



Figur 2.3.3-12. Böjutmattningshållfasthet som en funktion av antalet belastningar för två temperaturer.  
Figure 2.3.3-12. Bending fatigue strength as a function of number of cycles for two temperatures.

#### Diagnostisk belastning

Diagnostisk belastning är en betydande grupp externa störningar som förkortar livslängden hos generatorer. Uppkomsten av belastning kan förhindras effektivt med hjälp av skydds- och övervakningssystem samt genom att utrustningen används på rätt sätt. Diagnostiska störningar är bl.a.

- Överspänningar från både nätet och magnetiseringssystemet
- Fukt och smuts på lindningarna
- Övergående övertemperatur
- Mekaniska slag och mekanisk belastning

Typiska källor till överspänning är tillkopplings- och fränkopplingsöverspänningar, klimatöverspänning samt överspänning i driftfrekvensen. Överspänningar ansluts till rotorns magnetiseringslindning genom en likriktarbrygga. Utlösning av likriktardioder, fel i generatorskyddet och inkorrekt generatordrift kan även förorsaka överspänning. Erfarenheten visar att generatorer med borstlös magnetisering är lika känsliga för störningsspänningkomponenter som generatorer med statisk tyristormagnetisering.

Fukt minskar överslagshållfastheten och isoleringsmotståndet hos isoleringen. Vattenkylda generatorer är känsligast för fukt i isoleringen. Lindningarna blir vanligtvis fuktiga under driftstopp eller översyner när vatten kondenseras från den omgivande luften på generatorkomponenter med låg temperatur.

För mycket damm kan blockera lindningarnas ventilationskanaler och därigenom förorsaka heta punkter och skada på isoleringen. Damm uppkommer i alla generatorer under driften när t.ex. isolering, bakelit och järn smulas sönder och driver omkring i generatorn med ventilationen. Känsligast för damm är luftkylda generatorer där omgivande luft och damm kan komma in i generatorn genom dess lågtryckspunkter på grund av att statorstommen läcker.

Övergående övertemperatur är vanligtvis en följd av felaktiga vakter som inte förhindrar skadlig drift hos en generator, t.ex. under över- eller undermagnetisering. Orsaken kan också vara störning i kylsystemet när normal vattencirkulation är förhindrad i värmeväxlarna.

Generatoren utsätts för mekaniska slag t.ex. under en grov eller felaktig synkronisering eller under snabbåterkoppling till nätet. Transienter såsom kortslutning mellan två faser är den mest betydande mekaniska och elektriska belastningen hos en generator.

#### 2.3.3.3.2 Provning av rotorlindningar

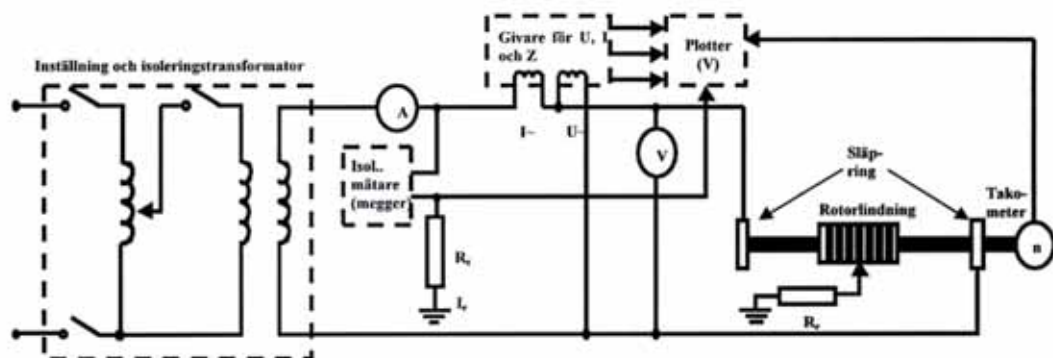
Mätningar som utförs på rotorlindningarna kan indelas i mätningar under drift (on line-mätningar) och mätningar under översyner (off-line mätningar).

##### *On line-mätningar*

On line-mätningar är:

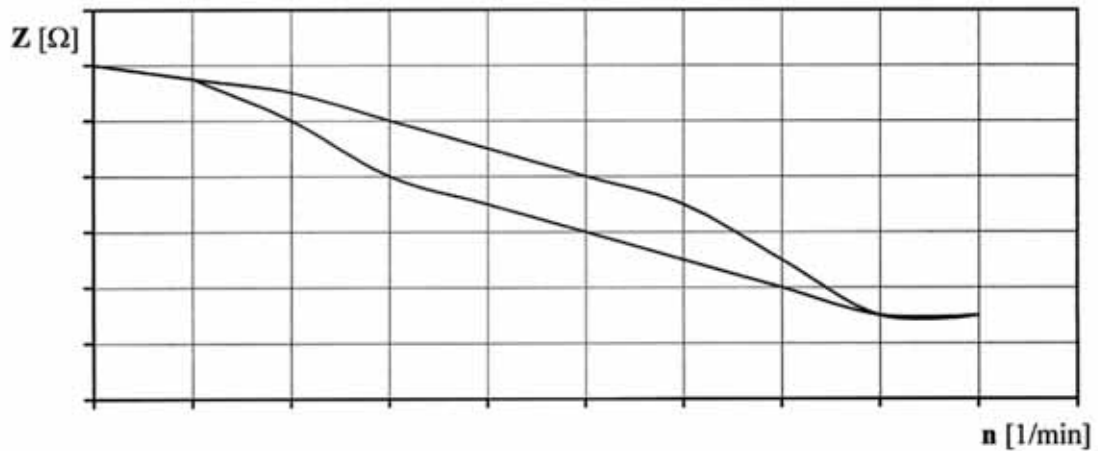
- Mätning av impedans och isoleringsmotstånd som en funktion av rotationshastigheten
- Mätning av tomgångspunkten
- Mätning och frekvensanalys av axelspänningen
- Mätning av rotorflödet i luftgapet

Kortslutningar och jordfel i lindningen kan upptäckas vid mätning av impedans och isoleringsmotstånd som en funktion av hastigheten. Dylka fel förorsakas av att rotorlindningen förskjuts till följd av förändringar i centrifugalkraften. Vid mätningen matas växelspanning till rotorkretsen, och spänningen, strömmen och isoleringsmotståndet mäts som en funktion av rotationshastigheten. Mätningen utförs med avställd generator, och därför kallas mätningen ofta nedkörningsmätning (shut-down measurement). Mätningen kopplas enligt Figur 2.3.3-13 och som resultat av mätningen erhålls en impedanskurva enligt Figur 2.3.3-14.



Figur 2.3.3-13. Mätning av impedans och isoleringsmotstånd som en funktion av rotationshastigheten.

Figure 2.3.3-13. The measurement of impedance and insulation resistance as a function of rotational speed.

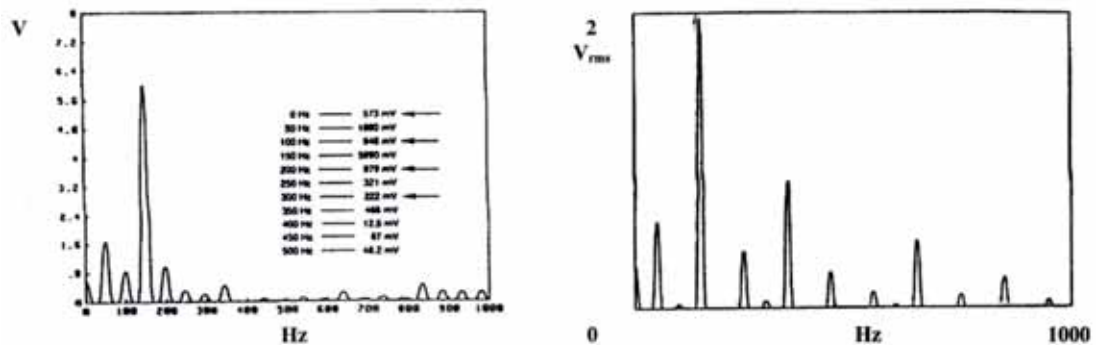


Figur 2.3.3-14. Impedanskurva som en funktion av rotationshastigheten.  
Figure 2.3.3-14. Impedance curve as a function of rotational speed.

Impedanskurvan för en generator som är i gott skick är nästan rak och stiger eller sjunker linjärt beroende på dämplindningens egenskaper. Om kurvan uppvisar branta förändringar, över 3 %, eller långsamma förändringar, över 10 %, indikerar detta kortslutning mellan varven. För att säkerställa att tolkningen av mätresultaten är tillförlitlig måste mätresultaten jämföras med resultaten av fabriksmätningen. Mätningen kan inte utföras på generatorer utrustade med en roterande diodbrygga.

Med mätning av impedanskurvan eller -punkten vid tomgång kan kortslutning mellan varven också upptäckas. Mätningen görs genom att statorspänningen mäts som en funktion av magnetiseringsströmmen. Kurvan eller punkten som erhålls på detta sätt är inte en absolut indikering av kortslutning, men resultatet skall jämföras med tidigare mätningar som gjorts på en maskin som är i skick, t.ex. på fabriken eller under drifttagningen. En spänningsnedgång på ungefär 2-5 % indikerar eventuell kortslutning mellan varven, vilket skall säkerställas under mätning med avställd maskin.

Vad gäller rotorlindningen kan axelspänningsmätning och frekvensanalys utnyttjas för diagnostisering av kortslutning mellan lindningsvarven. Spänningsspektret visar dessa fel som en ökning av likströmskomponenten, komponenterna med grundfrekvens och de parvisa harmoniska komponenterna. Komponenterna kan uppvisa en ökning på upp till 20-60 % beroende på belastningen. Spänningsspektrana för lindningar där kortslutning mellan varven uppträder respektive icke uppträder framgår av Figur 2.3.3-15.



Figur 2.3.3-15 Axelspänningsspektrum för en lindning med (till vänster) resp. utan (till höger) kortslutning mellan varven.

Figure 2.3.3-15. The spectrum of shaft voltage for a winding with (left) and without (right) interturn short circuit.

#### Mätningar och inspektioner under översynen

Exempel på mätningar och inspektioner av rotorlindningen under översyn är:

- Okulär inspektion
- Mätning av lindningsmotståndet
- Mätning av isoleringsmotståndet
- Impedansmätning som en funktion av strömmen
- Högspanningsprov
- Stötspanningsprov

Under en okulär inspektion undersöks rotorn och härvändarna med avseende på eventuell deformation. En undersökning av deformation kan endast göras med demonterade kapselringar. Om kapselringen inte lösgörs kan rotorisoleringens kondition och nedsmutsningen av den bedömas med hjälp av endoskopiinspektion. Eftersom belastningen på lindningarna är störst vid spårändarna är det bästa sättet att externt bedöma lindningarnas kondition att undersöka spårslindningsändarna. Jordfel uppträder vanligtvis vid magnetiseringslindningens anslutning eller vid spårändarna.

Motståndsmätning av rotorlindningen verifierar dålig kontakt hos lindningarna och permanenta jordfel. Motståndet mäts mellan släpringarna i rumstemperatur. En förändring på ungefär 2 % i motståndsvärdet indikerar att rotorlindningens anslutning är dålig eller att jordfel uppträder.

Isoleringsmotståndet mäts mellan släpringarna med en mätspänning på vanligtvis 500 eller 1000 V, och mättiden är en minut. Före mätningen måste kolborstarna demonteras eller dioderna i en roterande diodbrygga kortslutas. De uppmätta 15 sekunders och en minuts motståndsvärden registreras och används vid beräkningen av lindningsisoleringens polarisationsindex (PI). PI-värdet hos en torr och ren maskin är minst 1,3 och isoleringsmotståndet minst 2 MΩ vid 40 °C.

Impedansmätning är ett användbart redskap för diagnostisering av kortslutning mellan varven i rotorn. Vid mätningen matas den uppmätta växelspänningen in i rotorkretsen mellan släpringarna och motsvarande ström mäts upp. Impedansen räknas därefter ut utgående från uppmätt spänning och ström. I motsats till on line-impedansmätning mäts impedansen nu som en funktion av ström upp till 20 A. Direkta slutsatser av mätningen kan inte göras, eftersom man för att kunna tolka mätningen alltid behöver

en jämförelsekurva som mätts antingen på fabriken eller under drifttagningsproven. Impedansmätning kan inte utföras på generatorer med borstlös magnetisering.

Högspänningsprovet görs i samband med en allmän översyn. Provet görs med 1000 V växelspänning på en gammal generator; vid drifttagning är spänningen maximalt 80 % av fabriksprovvärdet. Dioderna i borstlösa magnetiseringsmaskiner måste vara kortslutna under högspänningstestet.

Stötspänningsprov används för lokalisering av ställen med dålig kontakt, kortslutning mellan varven och jordfel. Under mätningen matas en brant puls, vanligtvis 500 V, in i två uttag samtidigt och de reflekterade pulserna uppmäts. De pulser som felfria generatorer reflekterar är identiska mellan olika uttag.

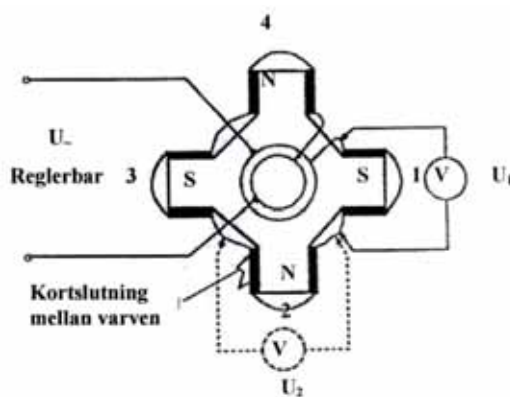
I elmaskiner med utpräglade poler kan fellokaliseringen relativt noggrant bedömas utifrån resultaten av ett stötspänningsprov. Det finns dock alltid en risk för att mätningen förorsakar rotorn större skada. Testpulsens höjd borde därför alltid bestämmas utifrån tidigare mätningar.

För turbogeneratorers rotor är denna metod inte så vanlig eftersom mätningen endast kan utföras på rotorlindningar med jordad Y-anslutning eller med en magnetisering bestående av två eller flera parallella lindningar.

#### *Fellokaliseringsmätningar*

Att upptäcka och lokalisera fel på rotorn är ett mycket direkt och målmedvetet arbete, men det finns inga speciella regler för fellokalisering på grund av skillnaderna mellan olika rotormodeller. Följande exempel visar två olika fel och två tekniker som tillämpats för att lokalisera felen.

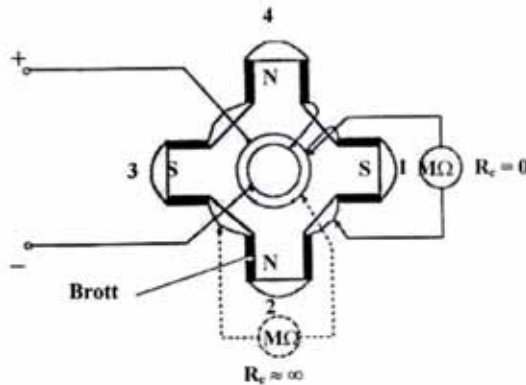
I en rotorlindning uppträder kortslutning mellan varven enligt Figur 2.3.3-16. I fråga om elmaskiner med icke-utpräglad pol kan spänningsdistributionen uppmätas i den mån rotorlindningens varv kan nås t.ex. genom ventilationskanalerna. Vid mätningen matas växelspänning in mellan släpringarna och spänningen mäts mellan varje varv och jord (=axeln).



**Figur 2.3.3-16. Lokalisering av kortslutning mellan varven i en elmaskin med utpräglade poler genom mätning av spänningsdistributionen.**

**Figure 2.3.3-16. Locating an interturn short circuit of a salient poled rotor by measuring the voltage distribution.**

I Figur 2.3.3-17 lokaliseras ett brott antingen genom att man mäter spänningen över polen eller isoleringsmotståndet i pollindningen. Vid spänningsmätningen matas en låg spänning in i lindningen, som inte behövs vid isoleringsmotståndsmätningen.



Figur 2.3.3-17. Lokalisering av ett brott i en elmaskin med utpräglade poler genom mätning av isoleringsmotståndet.

Figure 2.3.3-17. Locating a break of a salient poled rotor by measuring insulation resistance.

#### 2.3.3.3.3 Återstående livslängd hos rotorlindningar

Åldringsmekanismerna hos en rotorlindning är:

- Termisk åldring
- Elektrisk åldring
- Mekanisk åldring
- Åldring föranledd av förhållanden i omgivningen
- Kombinerad åldring

Bedömningen av livslängden hos en rotorlindning görs utgående från samma kriterier som för en statorlindning, Bilaga B. Utvecklingen och övervakningen av konditionen grundar sig på regelbundna konditionsmätningar och inspektioner av objekt presenterade i Bilaga A.

#### 2.3.3.4 Återhållarringar

Den huvudsakliga uppgiften hos återhållarringarna i rotorerna med parallella spår är att stödja lindningarna mot både axial- och radialkrafter. Ringarna utsätts då för stora centrifugal- och transientkrafter; kapselringen är en av de mest belastade enskilda delarna i en generator. Under driften belastas återhållarringens struktur förutom av centrifugalkrafter även av rotorstommens vikt, härvändarna, kapselringarna och kortslutningsringarna, vilket kräver att återhållarringarna har stor krymphållfasthet. Utöver sin normala uppgift fungerar återhållarringen även som en del av den ofullständiga dämplindningen, vilket kräver en ledande anslutning mellan kil och kapselring och en isolerande anslutning mellan återhållarring och rotorstomme.

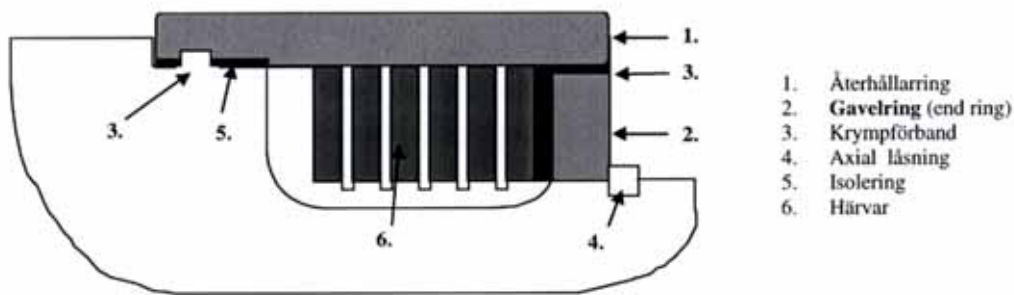
I takt med den allmänna utvecklingen av generatorer har betydande förbättringar åstadkommit vad gäller korrosionstålighet och töjningshållfasthet. På 80-talet ersattes austenit-manganstållegeringen (X 55 MnCr(N) 18 K) som användes i återhållarringarna av ett nytt material med beteckningen P900 eller X 8 CrMnN 18 K. Problemet med de äldre materialen var bristfällig draghållfasthet och känslighet för korrosion till följd av fukt. I det nya materialet är detta problem eliminerat i och med att kromhalten höjts till



18 %, vilket å andra sidan har minskat återhållarringens draghållfasthet. Av denna orsak används den nya legeringen än så länge endast i de minsta generatorerna på cirka 150 MW.

Målet i utvecklingen av återhållarringar inom den närmaste framtiden är att öka spänningshållfastheten i återhållarringmaterialen till 1400 N/mm<sup>2</sup> och att förbättra korrosionståligheten. I dag finns det vissa legeringar tillgängliga vars spänningshållfasthet till och med överskrider 2000 N/mm<sup>2</sup>. Dessa material används tills vidare i specialmaskiner, t.ex. högvarviga maskiner.

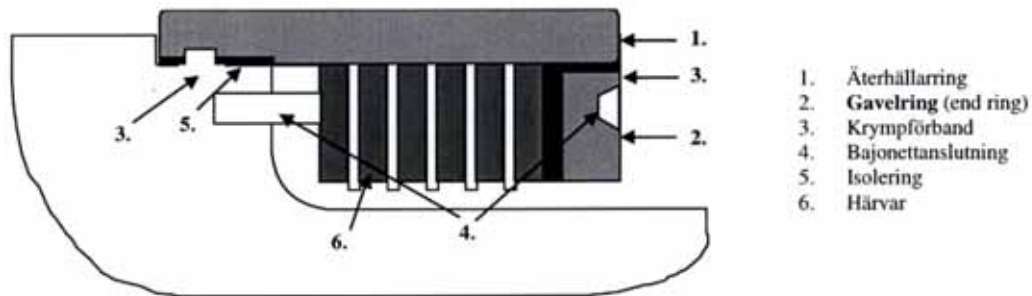
De återhållarringar som är i bruk i dagens läge är dubbelkrympta eller fribärande konstruktioner (double-shrink fitted or flying structures). I dubbelkrympta konstruktioner är ringen fäst vid rotorstommen enligt Figur 2.3.3-18, varvid ett isoleringsskikt kan befinna sig mellan återhållarring och rotortandanslutning såsom framgår av figuren eller så kan anslutningen vara oisolerad. Problemet med en dubbelkrympt återhållarringkonstruktion har varit den styva kontakten mellan anslutningarna, vilket har lett till att anslutningspunkterna lätt har skadats.



Figur 2.3.3-18. Isolerad, dubbelkrympt återhållarring.

Figure 2.3.3-18. An insulated, double shrink fitted retaining structure

Problemen med dubbelkrympta återhållarringar elimineras med hjälp av fribärande konstruktioner där ringen är fäst vid rotorstommen endast vid rotorändarna. Konstruktionen presenteras i Figur 2.3.3-19. För att förhindra rörelsen i axialriktning hos ringkonstruktionen kan ringen fästas med en axial gänglåsring (thread locking ring), en fjäderring eller en bajonettanslutning. Fördelarna och nackdelarna med de olika kopplingsmetoderna har inte kunnat klart fastställas och användningen av olika metoder beror huvudsakligen på tillverkare.



**Figur 2.3.3-19. En fribärande återhållarringkonstruktion utrustad med bajonettanslutning.**  
**Figure 2.3.3-19. A flying retaining ring structure equipped with a bayonet connection.**

#### 2.3.3.4.1 Skador i återhållarringar

Orsakerna till skador på återhållarringarna kan indelas i elektrisk och mekanisk belastning. Återhållarringen utsätts för elektrisk belastning om rotorn har en ofullständig dämplindning som består av kilar och kapselringar.

I ofullständiga dämplindningar rör sig dämpströmmen och utjämningsströmmen över rotortändarna från en kil till en annan, och den kan även transporteras genom kapselringarna. Om impedansen i krympförbandet av en eller annan orsak ökar uppstår brännmärken. Därför tillsätter en del generatortillverkare silver i krympförbandet för att minska övergångsmotståndet.

I fullständiga dämplindningar uppträder övergångsströmmar inte så länge burlindningen är hel och krympförbandsisoleringen i god kondition. Elektriska skador kan fungera som katalysator för uppkomsten av mekaniska skador.

Mekaniska skador på återhållarringarna härrör från nötnings- och spänningskorrosion. Nötningskorrosion beror på att rotoraxeln är skev. När rotoraxeln böjs leder det till att också den styva dubbelkrympta kapselringen böjs, vilket leder till att återhållarringen och rotorstommen skaver mot varandra. När krympförbandet skadas, föranleder skavningen korrosion som slutligen fräter sprickor i återhållarringanslutningen och rotortändarna. Sprickorna kan i värsta fall leda till att kapselringarna och hela generatoren förstörs.

Tangential- och radialkrafter som uppkommer när rotoraxeln är böjd samt centrifugalkrafter kan förorsaka spänningskorrosion. Även om nötningskorrosion i krympförbandet skulle kunna undvikas, är anslutningen utsatt för stora axialkrafter förorsakade av den skeva axeln både när rotorn är avställd och när den roterar. Spänningskorrosion uppkommer ifall följande korrosionsfaktorer föreligger:

- Om materialet är utsatt för stor dragspänning
- I material där sprickor lätt uppstår till följd av dragspänning
- Om materialet är utsatt för ett korrosionsmedium

Dragspänning minskas allra effektivast genom att man väljer en tillräckligt tjock rotoraxel i förhållande till rotorstommen, vilket betydligt minskar rotoraxelns tendens att böjas. Tryckspänningen minskas genom att man väljer rätt kompression för återhållarringen. I vardera fallet är dimensioneringen en kompromiss av flera faktorer, och det kanske inte är möjligt att dimensionera generatoren på ett sätt som är för

delaktigt för återhållarringarna. Situationen har därför förbättrats genom att nya material för återhållarringar utvecklats som inte påverkas av korrosionsskador.

Det vanligaste ämnet som förorsakar korrosion är vatten, och det förorsakar vanligen problem endast under långa driftavbrott. Vid långa översyner måste därför säkerställas att vatten inte kan kondensera inne i generatoren. Detta är möjligt så länge generatorns temperatur hålls högre än rumstemperaturen eller fukten är förhindrad att tränga in i generatoren. Att plombera en generator har visat sig vara en mycket svår om inte omöjlig uppgift. Den bästa metoden är därför att hålla generatoren torr genom uppvärmning under översynen.

#### 2.3.3.4.2 Provning av återhållarringar

Kapselringarnas kondition övervakas genom okulär inspektion och ultraljudmätningar. Då återhållarringarna är i skick, görs okulär inspektion i syfte att finna sprickor förorsakade av belastning på återhållarringarnas yta och krympförbanden. Kilarna inspekteras med avseende på axial förskjutning.

De okulära inspektionerna kan effektiveras med hjälp av penetrantprovning, varvid sprickorna visas med röd färg, eller med fluorescerande vätska och ultraviolettlampa som visar sprickorna med gul färg. Med endoskop är det möjligt att bestämma tändernas kondition i spårändarna och härvändorna utan att öppna återhållarringen. En endoskopiinspektion kräver dock att kapselringkonstruktionen har en ventilationskanal genom vilken endoskopet kan skjutas in i återhållarringen.

De kritiska delarna i återhållarringarna är krympförbanden, isoleringsringarna, rotorspårerna och låsringarna. För tillförlitlig bedömning av konditionen hos dessa kritiska delar måste återhållarringen öppnas. De kritiska områdena inspekteras med avseende på brännmärken förorsakade av övergångsströmmar och spår av nötning förorsakade av rörelse. För bedömning av skadorna på återhållarringens innersida görs ytterligare en penetrantprovning av den inre ytan av den demonterade ringen.

De okulära inspektionerna kompletteras med ultraljudmätningar, där en ljudpuls som matas in i återhållarringen avslöjar sprickornas läge då pulsen reflekteras från sprickorna. Det erhållna resultatet påverkas av återhållarringens struktur och av krympförbandet, och därför måste resultatet jämföras med en referens över en ultraljudmätning som utförts på en oskadad återhållarring. Ultraljudsprovning kan också göras på en sluten återhållarring, men resultatet är exaktare om provningen görs separat på vardera sidan av en demonterad återhållarring.

#### 2.3.3.4.3 Återstående livslängd hos återhållarringar

De väsentligaste åldringsmekanismerna hos en återhållarring är materialrelaterade med hänsyn till:

- Mekanisk åldring
- Omgivningsrelaterad åldring
- Kombinerad åldring

Återhållarringar är mekaniskt starka och en återhållarrings uppskattade livslängd är längre än en lindnings livslängd. Därför görs en bedömning av återhållarringens livslängd i samband med bedömningen av rotorlindningens livslängd. Livslängdsbedömning och -övervakning grundar sig i praktiken både på konditionsövervakningen av lager och på trenden av vibrations- och

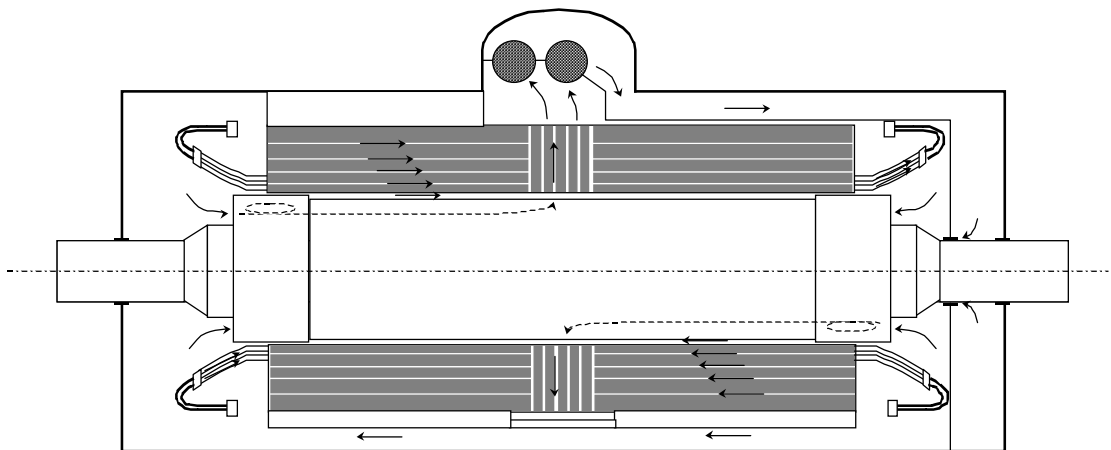
axelspänningsmätningar. Föremålen för konditionsövervakning och inspektioner framgår av Bilaga A.

Reparationsåtgärderna i fråga om mekaniska skador är normala service- och underhållsmätningar som utförs i en lämplig serviceverkstad. Det är dock att märka att det ofta är arbetsamt och tidsödande att reparera återhållarringar. Därför håller en del anläggningsägare extra återhållarringar på lager för plötsliga haverier. Detta gäller speciellt då återhållarringen är tillverkad av ett känsligt material.

#### 2.3.3.5 Statorer

En statorenhet består av en statorstomme och ett plåtpaket. Statorstommen är gjord av tunna, kompakta armaturplattor som är isolerade från varandra med ett tunt skikt av lack eller, i äldre modeller, med papper. Pappersisoleringen ersattes av lackisolering i slutet av 60-talet, eftersom pappersisoleringen hade en tendens att nötas. Nötningen förorsakade kortslutning mellan bleck och till följd av detta virvelströmmar som värmden plåtpaketet. I de nyaste, lackisolerade modellerna är detta problem inte längre så betydande. Ankarplattornas magnetiska egenskaper har förbättrats med tiden och sålunda har man kunnat minimera plåtförlusterna hos statorn. Mindre förluster förbättrar effektiviteten men påverkar inte direkt generatorernas livslängd.

För att förbättra kylningsegenskaperna är statorns plåtpaket uppdelat i sektioner som är separerade från varandra med kylkanaler. Beroende på kylsystemet cirkuleras antingen luft eller väte i kanalerna. Kylningsprincipen vid väte- och luftkylda generatorer framgår av Figur 2.3.3-20.



**Figur 2.3.3-20.** En turbogenerators kylningssystem. Pilarna beskriver strömningsriktningarna för väte och luft.

**Figure 2.3.3-20.** Cooling system of a turbogenerator. Arrows depict the stream course of water or hydrogen.

Plåtpaketet spänns åt med hjälp av tryckplattor, fingerplattor (finger plates) och bultar. Beroende på tillverkaren går bultarna antingen genom paketet eller runt bakre sidan av paketet. På grund av läckflöden i plåtpaketänden är tryckplattorna och fingerplattorna tillverkade av icke-magnetiskt stål eller aluminium för att förhindra för stor uppvärmning av materialen. Verkningarna av läckflödena begränsas också genom att plåtpaketet är koniskt format. Efter att plåtpaketet monterats vibreras det induktivt

samtidigt som det pressas ihop, vilket spänner åt paketet och förbättrar dess vibrationstålighet.

I vätekylda generatorer är stommen gjord av svetsat, gas- och vätsketätt järn. Stommen bildar tillsammans med vätetanken, gaskylarna och andra trycksatta delar ett slutet system som vid behov måste kunna motstå en intern väteexplosion. Många av de nya luftkylda generatorerna tillverkas i gastät design för att förhindra att gaser och andra partiklar skall kunna tränga in i generatorm.

Statorkilarna tillverkas av bakelit eller glaslaminat, men användningen av magnetiskt ledande material undersöks också. Ett betydande framsteg skedde på 70-talet när nya elastiska stödelement kom ut på marknaden. Stödelementen placeras under kilarna där de till skillnad från tätningsband genererar en konstant stödkraft oberoende av om lindningarna är lösa. En så kallad het förkilningsmetod (hot pre-wedging) tillämpas också vid placeringen av kilarna. Enligt denna metod föråldras kilarna först termiskt och mekaniskt, varefter lindningarna spänns åt och kilas. Fördelen med denna metod är större och mer stabil koercitivitet hos lindningarna.

#### *Statorkylning*

Kylningen av en stator är konstruerad på så sätt att den interna temperaturökningen hos generatorm hålls inom isoleringens och det övriga materialets bruksgränser och att den ömsesidiga termiska expansionen hos materialen hålls tillräckligt liten. Det tredje målet vid konstruktionen är att eliminera eventuella heta punkter, vilket förutsätter kylning av alla delar i generatorm.

Generatorm kyla antingen med gas (väte eller luft) eller med både gas och vatten. Stora generatorer kyla med bådadera. Vatten strömmar genom värmeväxlare och statorlindningar; rotn och statorns aktiva delar kyla med gas. I de största generatorerna sker kylningen av statorlindningarna med direkt vattenkylning, varvid vattnet cirkulerar inuti statorstavarna.

I vattenkylda generatorer måste vätestrycket hållas tillräckligt högt och stabilt, eftersom kylningseffektiviteten, och därmed också belastningskapaciteten, beror på vätestrycket. En nackdel med vätekylning är att väte kan tränga in i lageroljan eller kylvattnet och på så sätt komma i kontakt med syre. Kontakten förorsakar att vätet exploderar, ifall vätehalten blir för hög. Av denna orsak måste vätekoncentrationen fortlöpande mätas inne i lageroljetanken och värmeväxlarna.

I vissa kylningslösningar regleras vätestrycket automatiskt som en funktion av belastningen. Faran med en dylik reglering är att vätestrycket sjunker under det dynamiska vattentrycket, vilket förorsakar att vatten läcker in i generatorm.

Destillerat vatten som cirkulerar inne i en vattenkyld generator kyla i yttre värmeväxlare, och kylgasen i gaskylare. I äldre modeller regleras kylningen genom att kylvattensflödet regleras manuellt. I nyare modeller justeras kylsystemet automatiskt antingen utgående från det inkommande eller från det utgående vattnet. I vissa generatorer används noggrannare mätmetoder. Temperaturvärdena mäts t.ex. i statorspåren med temperaturgivare så att mätvärdena kan användas för temperaturreglering. Vanligtvis är dock syftet med mätningen endast att ge larm i det fall att temperaturen i en mät punkt överskrider larmgränsen.

Kylsystemen hos en generator är dimensionerade så att kylvattnets maximala temperatur motsvarar den nominella driftpunkten. Detta bidrar för sin del till att en

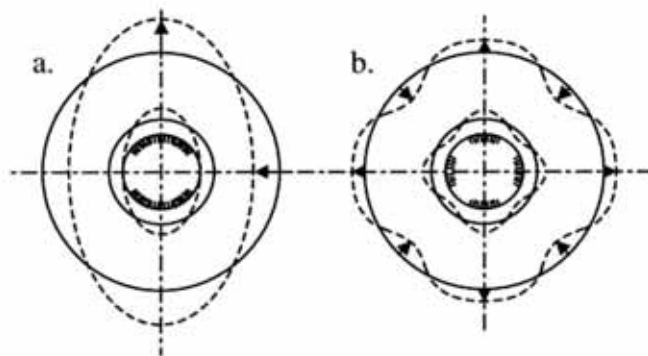
sådan situation undviks där kylningstemperaturen hos en luftkyld generator sjunker under rumslufttemperaturen, vilket kan inträffa under vintern i en situation med låg last. Å andra sidan förhindrar dimensioneringen att generatorn belastas över den nominella punkten, med undantag för korta stunder. Kylluftens temperatur måste alltid vara högre än den omgivande luftens för att kondensering av fukt skall kunna förhindras.

#### 2.3.3.5.1 Skador i statorer

Belastningar som påverkar plåtpaketet är:

- Vibrationer
- Tilltäppta ventilationskanaler
- Mekaniska skador
- Över- och undermagnetisering
- Fel i kylsystemet

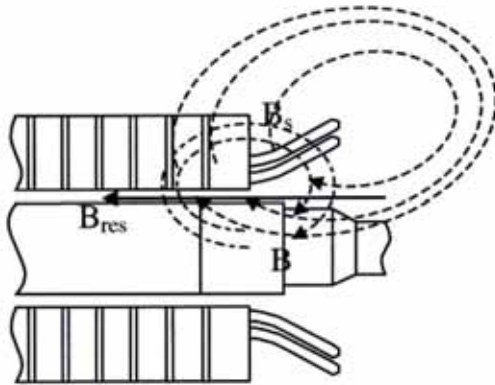
Vibrationer i plåtpaketet härrör från den magnetiska dragningskraften mellan rotorpolerna och statorn. Den magnetiska dragningskraften är proportionell till kvadraten av luftspaltsinduktionen. Den kan förorsaka en elliptisk deformation av plåtkärnan enligt Figur 2.3.3-21. När denna deformation roterar med rotorn förorsakar den vibrationer i plåtpaketet. Vibrationerna kan söndra isoleringen mellan plåtpaketets plattor, vilket förorsakar kortslutning och virvelströmmar som värmer upp plåtpaketet. Nötningen av isoleringen mellan blecken kan också föranleda att plåtpaketet blir lösare eller att nötningsskorrosion uppstår mellan plattorna.



**Figur 2.3.3-21.** En elliptisk deformation av plåtkärnan i plåtpaketet förorsakad av ett magnetfält i: (a) en tvåpolig och (b) en fyrapolig generator.

**Figure 2.3.3-21.** An elliptic deformation of a sheet packet caused by magnetic field in: (a) two and (b) four-poled generator's case.

Vibrationerna i plåtpaketet är större i en maskin där plåtpaketet har en större inre diameter och djupa statorspar som minskar styvheten hos plåtpaketet. Plåtpaketet kan stabiliseras genom att paketet stöds med elastiska stödelement som gör att generatorns naturliga frekvens hålls så långt ifrån den dubbla nätfrekvensen som möjligt. Detta förhindrar uppkomsten av förstärkande resonans. Vibrationerna kan även förflyttas till rotoraxeln genom sköldlagren eller axeltätningarna, vilket kan förhindras med separata lagerbockar.



**Figur 2.3.3-22 Uppvärmning av generatoren till följd av undermagnetisering.**  
**Figure 2.3.3-22. Warming of generator as a result of under-excitation.**

Plåtpaketets ventilationskanaler samlar lätt smuts, speciellt i den nedre delen av plåtpaketet där allt damm från yttre källor samt partiklar som lossat från lindningarna och plåtpaketet sätter sig. Generators ventilation transporterar dammet i ventilationskanalerna, där det, ifall det anhopas, kan täppa till kanalen. Detta förorsakar att plåtpaketet och lindningarna åldras i förtid. Smutspartiklar är ett betydande problem i luftkylda generatorer där kylluftens renhet måste kontrolleras genom regelbunden service och genom att övervaka att statorstommen är tät.

Mekanisk skada är vanligtvis en följd av lösa partiklar, t.ex. skruvar, som kommit in i generatoren i byggskedet eller under service. Föremål som hamnat in i generatoren kan blockera ventilationen eller, i värsta fall, transporteras till luftspalten och skada plåtpaketet och lindningarna.

Över- och undermagnetisering är i likhet med knapp kylning orsaker till att plåtpaketet värms upp. Uppvärmning av stators plåtpaket till följd av magnetisering är ett fullständigt normalt fenomen som kan åtgärdas endast genom generatordesign. Det enda sättet att reducera värmeförluster är tyvärr att förstora generatorstorleken. För att kunna hålla generators storlek inom ekonomiskt förnuftiga gränser måste generators ståldelar dimensioneras för en stor magnetisk flödestäthet.

När generatoren belastas i övermagnetiserat tillstånd, ökar det magnetiska flödet. Plåtpaketet mätas snabbt och förorsakar därmed att järnet värms upp kraftigt. Uppvärmningseffekten är som störst i statorspåren där kylningen är svagare än i tandområdet. Uppvärmning kombinerad med annan belastning av plattornas isolering leder till att isoleringen skadas, vilket i sin tur förorsakar virvelströmmar och ytterligare uppvärmning eller att plåtpaketet delvis smälter.

Vid undermagnetisering upphäver inte härvändarnas magnetiska fält varandra.

Resultatet är ett flöde i axialriktning, vilket förorsakar uppvärmande virvelströmmar i plåtpaketets ändor. Man strävar efter att minska virvelströmmarnas effekt på plåtpaketets ändor genom konisk formgivning av paketet och genom att klyva tändarna i spårändarna. Figur 2.3.3-22 åskådliggör karaktären hos och orsakerna till detta fenomen.



Värmeväxlarna och gaskylarna utsätts lätt för blockeringar förorsakad av metallpartiklar och isoleringsmaterial som lossat. Om naturligt vatten används vid kylningen kan också små organismer och mineraler i vattnet blockera strömningskanalerna på sekundärsidan. Blockeringarna leder till störningar i kylvattencirkulationen och kan till och med förhindra kylningen, vilket leder till överupphettning och skador på generatoren.

Med vattenkylda generatorer finns det en risk för att kylvatten läcker in i maskinen genom trasiga vattenledningar, gaskylare eller ledningsförgreningar. I små mängder förorsakar vattnet korrosion och i större mängder jordfel. Indikationer på kylvattensläckor är förhöjt vattentryck och fukt på statorstommen och statorns nedre del. Generatoren kan utrustas med läckvakter som reagerar på fukt och ger larm i fall av läckage.

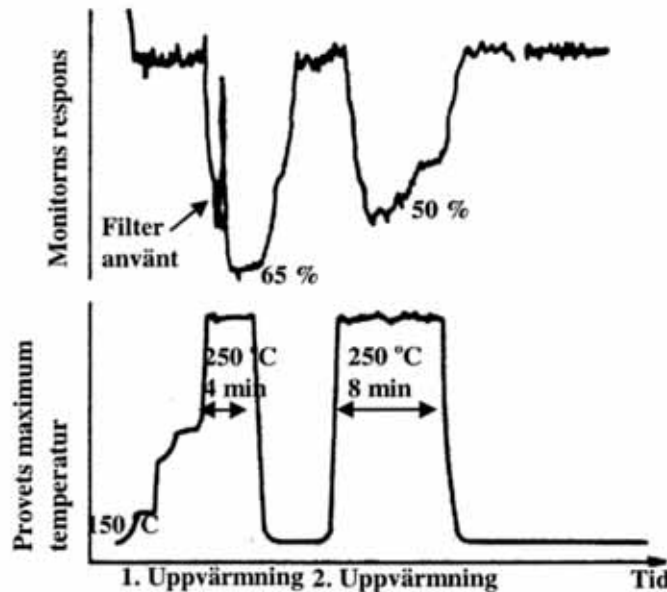
Ifall en generator har direkt vattenkylning inom statorstavarna måste det destillerade vattnets resistivitet följas upp eftersom den ökade jonkoncentrationen minskar resistiviteten hos vattnet, vilket leder till jordkortslutning i statorlindningarna.

#### 2.3.3.5.2 Provning av statorer

##### *On line-mätningar*

Plåtpaketets temperatur och kondition övervakas under drift genom partikelanalys av kylgasen. Partiklarna härrör från ytan av överhettade isoleringar eller t.ex. från olja som har läckt in i generatoren. En överhettad skadad isolering börjar emittera partiklar vid cirka 200...260 °C, men om isoleringsskikten är tjocka kan skillnaden mellan de inre och yttre temperaturerna variera med många hundra grader.

Mätningens känslighet ökas genom kemisk behandling av isoleringen, varvid något tillsatssämne som lätt förångas blandas med isoleringsmaterialet. Ifall isoleringen behandlas med flera olika tillsatssämen lokalt är det möjligt att göra en grov uppskattning av var skadan befinner sig. Det är rätt så svårt att genomföra och tolka en mätning, eftersom partiklar under förbränningsprocessen emitteras under en ytterst kort tid. Dessutom beror partiklarnas kemiska struktur på isoleringens termiska historia, som direkt påverkar förbränningsavlagringarna, mängden av avlagringar eller vardera. Figur 2.3.3-23 visar en respons från en monitor kopplat till plåtpaketet.



Figur 2.3.3- 23. Effekten av konsekutiva uppvärmningsperioder på mängden av partiklar som isoleringen emitterar.

Figure 2.3.3-23. The effect of consecutive heating periods to amount of particles emitted by insulation.

Den mätutrustning som finns tillgänglig för partikelanalys är core monitor, ljus- och fotonjoniseringsdetektor och fluorescensindikator. De tre första mätinstrumenten identifierar främmande föremål i kylgasen; dessutom kan den kemiska strukturen hos främmande föremål analyseras med en fluorescensindikator. Den kemiska analysen av partiklarna utförs med hjälp av gaskromatografi och massaspektrometri som noggrant kan bestämma kvaliteten hos partiklarna i kylgasen.

#### *Mätningar och inspektioner under översynen*

Under översynen övervakas plåtpaketet med hjälp av kärnprov (se nedan), täthetsprov och okulär inspektion. Statorstommens täthet, korrosionsutsatta punkter, fästning vid grundplattan och grundplattans kondition inspekteras genom okulär inspektion av statorstommen. Utöver den okulära inspektionen inspekteras även värmeväxlarna och gaskylarna med hjälp av tryckprov och ultraljudmätningar.

De okulära inspektionerna av plåtpaketet koncentrerar sig på mekaniska skador, i synnerhet i tandområdet. Vid inspektionen upptäcks skador på tandisoleringen, lösa plattor, nötningskorrosion och lokala svetsmärken.

Spänningen av plåtpaketet bestäms med ett så kallat knivprov, varvid man försöker pressa in en tunneggad kniv på bakre sidan av plåtpaketet. Om kniven penetrerar mer än 6 mm av paketet visar det att paketet är mjukt och måste spännas åt. Ifall plåtpaketet har spänts med tryckbultar mäts paketets täthet med ett knackningsinstrument, varvid paketets täthet bedöms utgående från den akustiska responsen från bultarna.

Kortslutningar i plåtpaketet lokaliseras med hjälp av ett kärnprov (ring flux test), där plåtkärnan är magnetiserad med hjälplindningar, och kortslutningar lokaliseras antingen med hjälp av en termografisk kamera eller en induktiv detektor (EL-CID).

Med en termografisk kamera magnetiseras statorn nästan till det nominella flödet, vilket förorsakar virvelströmmar längs det kortslutna området. Virvelströmmarna värmer upp området så att skadan tydligt upptäcks av kameran såsom Figur 2.3.3-24 visar. Mätningen kräver en stor magnetiseringsström, vilket innebär att mätningen är snabb och tillförlitlig i och med att den blottar alla skador på statortändernas yta. Men en stor magnetiseringsström kräver också en stark matning, eftersom magnetiseringsströmmen i stora generatorer till och med kan överstiga 600 A. Försiktighet måste iakttas eftersom kylningen av statorn inte fungerar normalt under provet, vilket kan skada statorn om vissa fel under provningen uppträder.

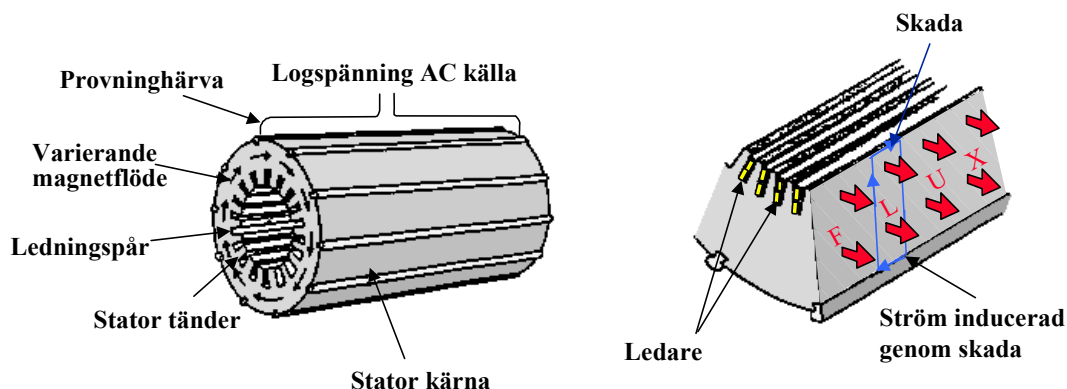


**Figur 2.3.3-24. Plåtpaketsprov med termografisk kamera.**

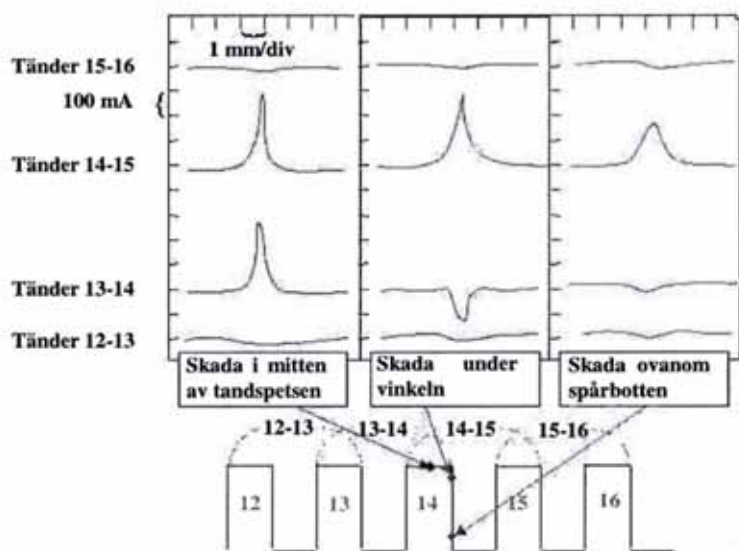
**Figure 2.3.3-24. Stator core test performed with a thermographic camera.**

Vid en induktiv EL-CID-mätning magnetiseras statorn med ett litet flöde på ca 5 % av det nominella som förorsakar virvelströmmar mellan plattorna i statortänderna samt läckfält. Läckfälten mäts med en Rogowsky-spole spår för spår så att givaren mäter läckfälten över två statortänder åt gången. Under mätningen förs givaren längs spåret från den ena ändan av plåtkärnan till den andra, så att de skadade punkterna observeras som spänningstoppar vid mätpolens utgång. Mätresultaten registreras i en kanal i en XY-plotter, medan den andra kanalen matas med en signal som är proportionell till givarens avstånd. Resultaten erhålls sålunda som en funktion av plåtpaketets längd.

Resultaten av den induktiva mätningen röjer även kortslutningar mellan plattorna på spårbottnen utan ytterligare belastning av statorn. Mätningen reagerar dock inte på fel på statortändernas yta. Anslutningen av mätningen visas i Figur 2.3.3-25 och principerna för tolkning av mätresultatet framgår av Figur 2.3.3-26.



Figur 2.3.3-25. Anslutning av och principen för EL-CID-mätning.  
Figure 2.3.3-25. The coupling and the principle of EL-CID measurement.



Figur 2.2.3-26. Mätspolens signaler enligt skadans läge.  
Figure 2.3.3-26. The signals of measurement coil according to the position of damage.

Under den okulära inspektionen av värmeväxlarna och gaskylarna inspekteras, rengörs och vid behov repareras kylarnas rör och kamrar. Beroende på omfattningen av servicen rengörs och inspekteras även vätesidan hos vätekylda generatorer, varvid kylarna avlägsnas från statorstommen. Värmeväxlarnas och kylarnas rör inspekteras med virvelströmsmätning.

I samband med kylarservice inspekteras även ventilernas, kranarnas och tankarnas tätningar och åtgärdas vid behov. Temperatur- och tryckgivarnas funktion och kondition kontrolleras likaså. Efter service men före drifttagning verifieras kylarnas och rörens täthet och trycktålighet med ett tryckprov med generator- och kylarspecifikt provtryck.

### 2.3.3.5.3 Återstående livslängd hos statorer

De viktigaste åldringsmekanismerna hos en stator är:

- Mekanisk åldring
- Åldring föranledd av förhållanden i omgivningen och
- Kombinerad åldring

Statorn är mekaniskt stark och den uppskattade livslängden hos en stator är mer än tio gånger längre än lindningarnas. Därför är det svårt eller nästan omöjligt att uppskatta livslängden. I praktiken grundar sig uppskattning och övervakning av livslängden på vibrationsmätningar, kärnprov och okulär inspektion. Föremålen för konditionsmätningarna och inspektionerna framgår av **Bilaga A**.

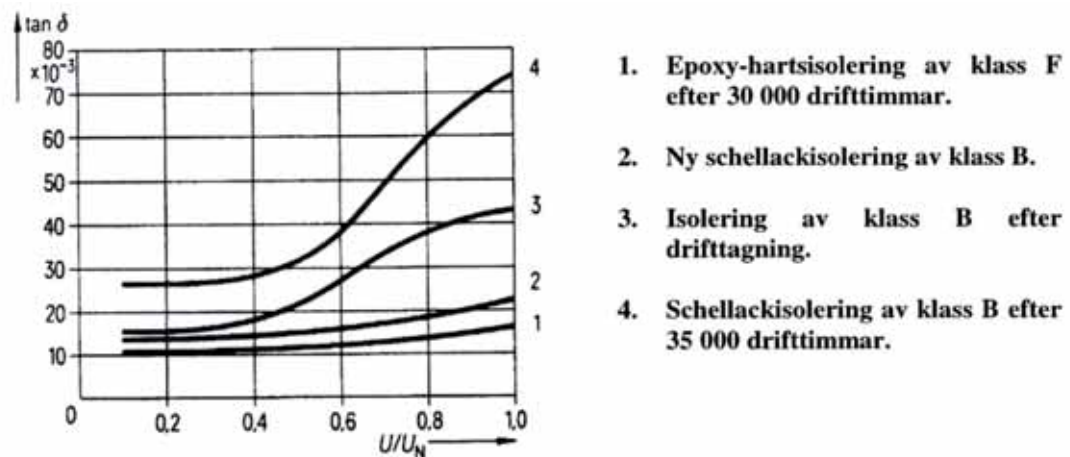
Korrigerande åtgärder under mellanöversynerna är rengöring, åtspanning av plåtpaketet och uppriktning av blocken (i vattenmaskiner). I samband med omlindning kan en del av plåtpaketet moderniseras.

### 2.3.3.6 Statorlindningar

Isolerings- och ledarmaterialen i statorlindningar är huvudsakligen likadana som i rotorlindningarna: en typisk statorisolering är en glimmer-epoxyisolering av klass F, och ledarna är tillverkade av silverlegerad koppar på samma sätt som hos rotorlindningar. Den väsentligaste skillnaden mellan stator- och rotorlindningar är att storleksklassen av spänningarna och strömmarna är en eller två dekader större i statorn än i rotorn. De stora strömmarna och spänningarna kräver därför tjockare ledare och lindningsisolering i statorn än i rotorn.

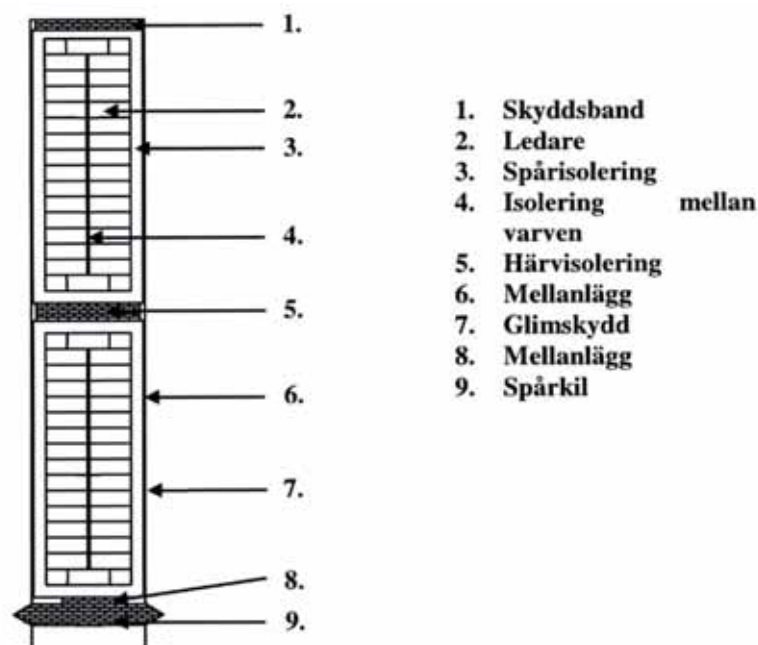
I fråga om statorlindningen är den ökade spänningståligheten hos isoleringsmaterialen viktigare än utvecklingen av ledande material. Lanseringen av glimmer-epoxyisolering i mitten av 60-talet har ökat den tillåtna fältstyrkans nivå upp till 3 kV/mm, varvid fenomenet med elträd har blivit den begränsande faktorn. Vi återkommer till detta fenomen senare.

Det nya isoleringsmaterialets struktur erbjuder bättre termisk expansion och vattentäthetsegenskaper. Äldre isoleringar av klass A och B saknade mer eller mindre dessa egenskaper, och expanderande kopparmetall ledde till att isoleringen lossade från kopparn. Andra fördelar med isoleringar av klass F är jämfört med äldre isoleringsmaterial de låga värdena för partiell urladdning och god termisk konduktivitet. Figur 2.3.3-27 visar mängden av partiella urladdningar som en funktion av drifttimmarna och spänningen.



Figur 2.3.3-27. Effekten av drifttimmar på förlustfaktorn med isolering av klass B och F.  
Figure 2.3.3-27. The effect of operating hours on loss factor with B and F-class insulation.

Statorns stavar placeras i spåren i två skikt. Isolering och mellanlägg används kring härvorna, och härvskikten separeras med härvisolering ovanpå mellanläggen. Härvornas struktur framgår av Figur 2.3.3-28. Stödelementen under härvorna är numera flexibla för att öka tryckkraften. Lindningsisoleringens ytor behandlas med ett nötningsålligt, ledande lack som genererar ett enhetligt potentialfält på statorhärvornas yta, varvid uppkomsten av ytströmmar förhindras.



Figur 2.3.3-28. Snittbild av en indirekt kyld roebelstav.  
Figure 2.3.3-28. The cross-section of an indirectly cooled bar.



Härvändarnas struktur är nästan identisk med spårledningarna; ett undantag till detta är dock ett ledande lackskikt som antingen helt utelämnats eller som ersatts med ett halvledande skikt. Härvorna måste stödjas noggrannare i härvändsområdena än i spåren, eftersom statorns härvändar under icke-normal drift, i likhet med rotorledningarna, utsatta för starka tangentiella och radiella krafter. Termisk expansion måste beaktas i vid stöttningen; därför måste lindningsstöden vara flexibla i lindningens axialriktning.

#### 2.3.3.6.1 Skador i statorlindningar

Skadorna och källorna till skador är i fråga om statorlindningarna huvudsakligen likadana som i fråga om rotorlindningarna. Den stora elektriska och elektrokemiska belastningen på grund av statorns höga spänningar betonas jämfört med rotorlindningarna. Belastningen av statorlindningarna kan indelas i

- Belastning till följd av termisk expansion
- Belastning till följd av flytning
- Mekanisk belastning
- Åldring föranledd av förhållanden i omgivningen belastning
- Elektrisk belastning.

Statorlindningarna tillåts en högre temperaturökning än rotorlindningarna, vilket ökar belastningen av termisk expansion. Termisk expansion är dock inte ett så väsentligt problem i statorns fall som i rotorerna: statorlindningarna är med undantag för härvändsområdena inte utsatta för en så stor mekanisk belastning i normala driftsituationer som rotorlindningarna. Termisk expansion måste beaktas i fråga om statorlindningarnas stöd. Dessa måste konstrueras på så sätt att de gör det möjligt för lindningarna att röra sig axiellt. Rörelsen som förorsakas av termisk expansion förorsakar att isoleringen, stödelementen och kilarna slits och blir lösa. Termisk expansion är en ytterst betydande livslängdsförkortande faktor i generatorer som fortfarande använder isolering av klass A eller B, eftersom mekanisk belastning i samband med termisk belastning kan göra att isoleringen lossar från lindningarna.

Härvändarna är speciellt känsliga för flytning eftersom de utsätts för stora förändringskrafter. Ifall härvändarna inte stöttats tillräckligt väl förorsakar dessa krafter permanenta deformationer i metallen i härvändarna, vilket leder till isoleringsskador. Flytstyrkan hos en statorlindning förbättras på samma sätt som hos rotorlindningar: genom silverlegerad koppar och kallbearbetning.

Transienter såsom olika kortslutningar, asynkron drift och grov synkronisering förorsakar mekanisk belastning av lindningarna och lindningsisoleringarna. Krafterna vid sådana transienter kan i värsta fall vara 160 gånger större än vid normal drift, och strömmarna vid stötspänningskortslutningar kan vara upp till 30 gånger större än den nominella strömmen. Transienterna ställer höga krav på härvändstöden, eftersom lindningarna måste hållas på plats också under sådana omständigheter för att förhindra vibration; vibrationer skulle snabbt leda till isoleringsskador, skörhet hos kopparn och slutligen till att ledaren skadas.

De magnetiska krafterna som svänger med dubbel nätfrekvens genereras av den kombinerade effekten av lindningsström och magnetiskt flöde, och de utövar en ytterst stark inverkan på spårkilar där det finns ledare från två olika faser. En konstant belastning minskar materialens böj hållfasthet.



Mekanisk belastning minskar isolationsspänningsstyrkan och böjhållfastheten, vilket har påvisats i experiment som utförts på vissa isoleringsmaterial. Livslängden hos ett flertal isoleringar har jämförts i experiment, där isoleringsobjekten påverkades av ett elektriskt fält ( $E = 20 \text{ kV/mm}$ ). När vissa av objekten töjdes ut nära brytpunkten och andra inte töjdes ut, upptäckte man att livslängden hos de uttöjda materialen minskade till en hundradel av livslängden hos objekt som inte töjts ut. När det elektriska fältet var  $10 \text{ kV/mm}$ , minskade livslängden till en femtedel. Den kombinerade effekten av en stor elektrisk fältstyrka och en spänning är speciellt anmärkningsvärd i härvändsområdet, där spänningarna är störst mellan olika härvor. Lindningarnas driftlängd kan förlängas förutsatt att lindningens nollpunkt kan flyttas. Nu bildas den nya stjärnpunkten utifrån de gamla fasledarna och fasledarnas nya utgång bildas utgående från den gamla stjärnpunkten.

Under tillverkningen av isoleringen är isoleringarna känsliga för krympspänning framkallad av torkning. Krympning var ett allmänt problem hos gamla schellack- eller asfaltbaserade isoleringar. Krympning till följd av torkning är ett fenomen som man numera kan hantera bättre, och isoleringarna torkas i hög temperatur, varvid en spänningslös situation uppnås i drift. Spänningarna hos existerande glimmerisoleringar är mycket små i drifttemperaturer, vilket gör att isoleringen sitter bättre runt ledarna. Som exempel ser vi i Tabell 2.3.3-6 några egenskaper hos två mycket använda glimmerisoleringar.

**Tabell 2.3.3-6 Egenskaper hos glimmerisoleringsmaterial**

| Isolering    | Glimmerhalt [%] | Bindmedelshalt [%] | Bärhalt [%] | Spänningshållfasthet [ $\text{N/mm}^2$ ] | Drifttemperatur [ $^{\circ}\text{C}$ ] vid olika material |              |         | Max. spänning [kV] |
|--------------|-----------------|--------------------|-------------|------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|--------------|---------|--------------------|
|              |                 |                    |             |                                          | Schellack                                                 | Alkyd, epoxy | Silikon |                    |
| Glimmerfolie | 40...50         | 25...40            | 20          | 30...50                                  | B 130                                                     | F 155        | H 180   | 20                 |
| Glasfiber    | 40...80         | 4...22             | 15...40     | 40...80                                  | B 130                                                     | F 155        | H 180   | 16...20            |

#### Diagnostisk belastning

De omgivningsrelaterade förhållandena som påverkar statorlindningarna skiljer sig inte mycket från rotorlindningarnas förhållanden. Diagnostiska störningar är i fråga om statorn:

- Överspänning i nätet
- Fuktiga och smutsiga lindningar
- Mekanisk stöt och belastning
- Övergående överhettnings

Fukt och smuts är ett vanligare problem i statorlindningarna än i rotorlindningarna, då damm, olja och vatten sjunker till botten av generatoren med blockeringar i ventiltionskanalerna och nedfuktning av isoleringarna till följd. Äldre isoleringsmaterial är känsligare för fukt och smuts, vilket minskar isoleringens spänningstålighet och motstånd märkbart. Vattentät glimmer-epoxyisolering är okänslig för fukt och förblir icke-ledande även om det blivit fuktigt, eftersom fukten inte kan tränga igenom den täta hartsen.

Övergående överhettning utsätts statorlindningarna för t.ex. vid undermagnetisering, när ett axiellt flöde går genom rotor- och statorlindningarna. Flödet förorsakar uppvärmande strömmar i det normalt kalla härvändsområdet, vilket kan visa sig vara en begränsande faktor vid undermagnetiserad drift. Temperaturökningen som uppkommer vid undermagnetisering minskar t.ex. genom ökad kylning i härvändsområdet, genom utbyte av ledande material mot antimagnetiska icke-metalliska material och genom installering av kopparplattor under kapselringarna. Energibranschens Centraförbund Finergy rf. i Finland kräver att generatorerna skall kunna drivas permanent med en effektfaktor på  $\cos\phi \leq 0,97_{\text{cap}}$ .

Den elektriska belastningen hos lindningarna hör huvudsakligen ihop med partiella urladdningar i isoleringen. Händelseförloppet är följande:

- Mekanisk nötning förorsakad av partiella urladdningar till följd av mekaniska och termiska effekter på isoleringsytan.
- Omedelbara reaktioner av partiella urladdningar på isoleringens yta: jonisering och radikalförändring som förorsakar kemiska reaktioner.
- Laddningsbärare som har uppkommit (joniserats) eller injekterats i ämnet sjunker djupare in i det.
- Indirekta kemiska effekter till följd av partiella urladdningar (luft  $\rightarrow$  kväveoxid + ozon) och fukt (kväveoxid  $\rightarrow$  kvävesyra).

Det finns dock några testresultat, erhållna speciellt i samband med termiska åldringstest, som tyder på att åldring är en följd av enbart ett elektriskt fält utan partiella urladdningar. Enkla teoretiska studier baserade på sönderfall av aktiveringsenergin till följd av elektriska fält har dock inte bekräftat denna observation. Ifall elektrisk åldring utan partiella urladdningar uppträder, är den en följd av andra faktorer med en starkare effekt.

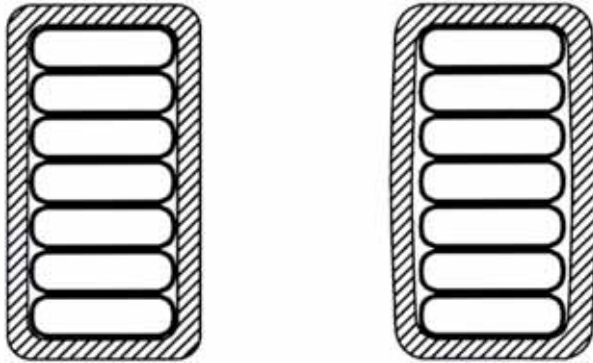
Vi nämnde tidigare att spänningståligheten hos en modern isolering av klass F tillåter över 3 kV spänning per isolerings-mm, men att ett så kallat elträdsfenomen visat sig vara en begränsande faktor. Ett elträdsfenomen innebär trädliknande områden som bildas inom isoleringsmaterialet. Dessa områden representerar så kallad ackumulerad nedbrytning av isoleringen; därför är de antingen en följd av skador, men de kan även fungera som kanaler genom vilka den egentliga urladdningen sker. I vissa fall är elträdsfenomenet förknippat med vattenträdsfenomenet där fukten som trängt in i isoleringen fungerar som en katalysator för urladdningen.

#### *Åldring av gamla och nya isoleringsmaterial*

Det finns vissa synnerligen stora skillnader mellan åldring hos gammal och ny isolering, vilket är en följd av strukturella skillnader mellan isoleringsmaterialen. Gamla högspänningsisoleringar är gjorda av asfalt-glimmerband. Denna isolering är vanligtvis förknippad med en stark termomekanisk åldringsmekanism, eftersom de använda asfalt- och bitumenbindämnena mjuknar redan vid 50°C. Under dessa förhållanden är isoleringen ytterst känslig för värmevariationer och kan inte krympa i samma utsträckning som koppar när det kallnar. Som en följd av gradvis krypning lossar isoleringen från kopparledaren.

Gamla generatorer hade och har fortfarande en schellackfolieisolering som spårisolering. Isoleringen formar normalt ett tätt skikt runt härvan, men till följd av termiska variationer sväller isoleringen och genererar en luftspalt mellan

spårisoleringen och ledarisoleringen. Svällningen ökar intensiteten hos partiella urladdningar i luftspalten, vilket tillsammans med termisk åldring gör isoleringen skör.



Figur 2.3.3-29. Isoleringsmaterial sväller och lossar.

Figure 2.3.3-29. The swelling and detachment of insulating material.

Skörheten och luftspalten gör det tillsammans möjligt för syre och fukt att tränga in mellan isoleringarna. Dessa två komponenter bildar till följd av kemiska reaktioner kvävesyra. Kvävesyran upplöser limmet mellan ledarna, varvid ledarelementen exponeras för magnetisk vibration som i sin tur nöter på isoleringen och leder till kortslutningar eller jordfel. Figur 2.3.3-29 visar en svullen spårisolering.

Den nya högspänningsisoleringen av epoxy-glimmer är termiskt stabil: uppmjukning börjar ske efter 120 °C. Vad gäller nyare isoleringar är problemet sålunda att placera och stötta lindningen på så sätt att inga luftspalter uppstår mellan spårisoleringen och statorspåret så att lindningen inte kommer åt att vibrera. Vibration i lindningen leder till att lindningen lossar från plåtpaketet, vilket i sin tur föranleder skavning och nötning av isoleringen.

Om en spalt som skiljer glimskyddet från plåtpaketet i alla fall uppstår mellan isoleringen och spåret kommer ett stort elektriskt fält att byggas upp över spalten. Ett tillräckligt stort elektriskt fält genererar en spårurladdning vars urladdningsenergi är betydligt större än energin hos partiella urladdningar. Spårurladdningar fräter snabbt sönder isoleringsytan, vilket leder till elektriskt genombrott i isoleringen. En bristfälligt polymeriserad epoxy-glimmerisolering som lossar från ledaren under drift kan också vara orsaken till genombrott och partiella urladdningar.

#### 2.3.3.6.2 Provnings av statorlindningar

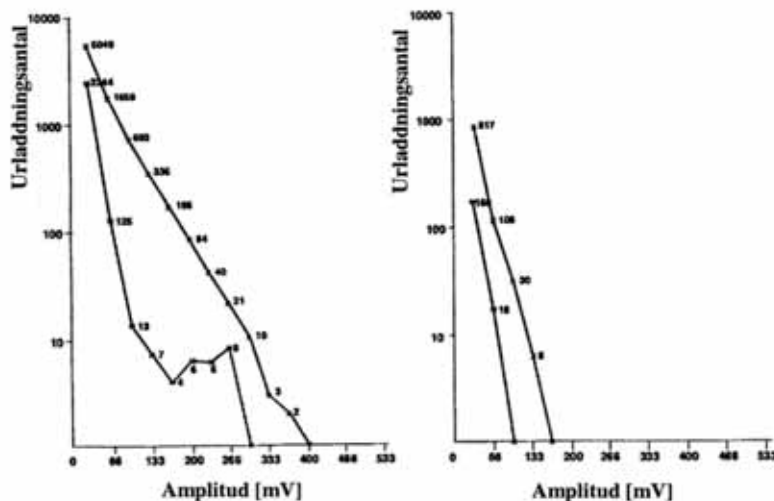
##### *On line-mätningar*

Statorlindningarnas kondition mäts under drift med hjälp av partiella urladdningsmätningar. Statorlindningarna utrustas med kopplingskondensatorer som fungerar som kapacitiva spänningsdelare mellan härva och jord. Under mätningen filtreras en 50 Hz läckström bort och antalet högfrekventa pulser per sekund, som härrör från partiella urladdningar, mäts. Om statorlindningarna har flera grenar kan de högfrekventa störningarna i nätet kompenseras genom att kondensatorerna i varje fas mäts parvis, vilket utjämnar störningarna i de olika faserna vid differentialförstärkarens ingång. On line-mätningen av partiella urladdningar är en

effektiv konditionsmätning av statorisoleringen, eftersom hela den normala belastningen i maskinen inverkar under mätningen.

Slutledningar vad gäller felets placering och svårighetsgrad kan göras utgående från antalet pulser och amplituden. Pulser med hög amplitud som uppträder på den positiva sidan av växelspänningen (negativa pulser) indikerar ett fel mellan ledaren och isoleringen. Positiva pulser med hög amplitud indikerar ett fel på isoleringens yttre yta eller i plåtpaketets spår. Om pulserna är både negativa och positiva uppträder urladdningar inne i isoleringen.

Utgående från mätningarna beräknas ett NQN-värde (Normalized Quantity Number) som uttrycker mängden av energi som frigörs vid urladdningarna. Ett högt NQN-värde är inte nödvändigtvis ett bevis på bristfällig isolering, eftersom värdet varierar i fråga om olika isoleringsmaterial. Därför måste värdet jämföras med tidigare mätningar utförda på samma generator, varvid värdet entydigt anger förändringar som skett i isoleringens kondition. Om ett NQN-värde fördubblas på sex månader är detta ett tydligt tecken på att isoleringens kondition försämrats. Figur 2.3.3-30 visar resultaten av några partiella urladdningsmätningar.



Figur 2.3.3-30. Resultat av partiella urladdningsmätningar för två lindningsgrenar. Grenen i det vänstra diagrammet är skadad.

Figure 2.3.3-30. Partial discharge measurement results for two winding branches. The branch of the left graph is damaged.

#### Mätningar och inspektioner under översyner

Under översyner övervakas statorlindningens kondition genom

- Okulär inspektion
- Mätning av lindningsmotståndet
- Mätning av isoleringsmotståndet
- Mätning av  $\tan\delta$  som en funktion av spänning
- Mätning av den partiella urladdningsenergin under en period
- Mätning av partiella urladdningar spår för spår
- Spänningsprov

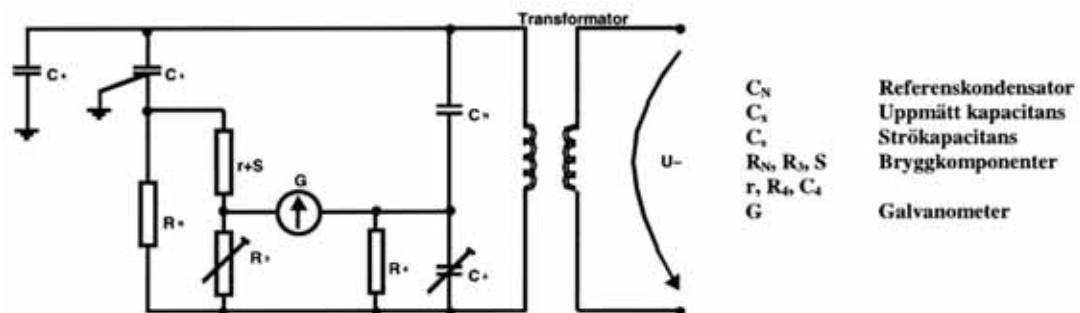
Under okulära inspektioner av lindningsisoleringen söker man efter eventuellt skadade och nedsmutsade lindningsområden. Om sådana områden hittas, klarläggs orsaken till skadan, och rengöring och reparation görs vid behov. Om det är möjligt ersätts den skadade lindningsisoleringen med en ny, vilket i fråga om spårlindningar innebär att en hel härva byts ut. Härvändarnas huvudisolering kan också bytas ut delvis.

Även lindningsstöden beaktas vid okulär inspektion. Stödets kondition granskas speciellt i härvändsområdet där den mekaniska belastningen på lindningarna är störst. Rörelser i lindningarna i äldre generatorer leder till att isoleringen blir lös, vilket är ytterst svårt att upptäcka visuellt eller genom mätning. Vid behov spänns de lösa härvändarna åt.

Statorns lindningsmotstånd mäts på samma sätt som rotorlindningens. Mätningen röjer skadade ledarelement och bristfällig lödning mellan härvorna. En förändring på ca 2 % mellan tidigare mätresultat och fabriksmätningen kan anses vara betydande och kräver omedelbara åtgärder.

Mätning av isoleringsmotståndet görs vanligtvis fasvis med 5 kV spänning, medan de övriga faserna är jordade. Kylvattenrören i vattenkylda generatorer måste fränkopplas från jord för att undvika att isoleringsmotståndet blandas med vatten- och fuktmotståndet. På samma sätt som för rotorn beräknas ett polarisationsindex (PI) utgående från mätresultaten. I fråga om statorn beräknas PI utgående från en och tio minuters värden. Statorisoleringen kan anses vara torr och ren, om statorns PI överskrider minimivärdet 1,3. Ifall isoleringsmotståndet är flera tusen megaohm saknar PI-värdet betydelse även om det skulle ligga nära ett.

Förhållanden i omgivningen påverkar på ett väsentligt sätt mätresultaten och därför kan mätningar utförda vid olika tidpunkter inte jämföras tillförlitligt med varandra. Syftet med mätningen är huvudsakligen att säkerställa att följande mätningar kan göras tryggt utan att lindningarna skadas.



Figur 2.3.3-31. Anslutning av förlustfaktormätningen.

Figure 2.3.3-31. Coupling of the dissipation factor measurement.

Mätningen av förlustfaktorn eller  $\tan\delta$  mäter förhållandet mellan isoleringens kapacitiva och resistiva ström. Förlustfaktormätningen görs fasvis som en funktion av spänning när växelspanningens effektivvärde höjs från  $0,2 \cdot U_N$  till  $1,0 \cdot U_N$ . Anslutning av mätningen framgår av Figur 2.3.3-31.

Vid tolkningen av  $\tan\delta$ -mätningen bör beaktas att förlustfaktorns storleksklass är maskin- och isoleringsspecifik, varvid mätresultaten bör jämföras med tidigare resultat.

Ifall inga tidigare resultat från samma generator föreligger, kan de aktuella resultaten kritiskt jämföras med resultaten från andra mätningar utförda på samma tillverkares generatorer, eller med gränsvärden angivna i standarder.

En av standarderna som tillämpas vid tolkningen av mätningarna är VDE 0530 (84), vars resultat visserligen avser nya enskilda härvor, men som är riktningsgivande för bedömningen av hela generatorns isolering. Förlustmängden karakteriseras av parametrar angivna i standarderna:

$$\tan \delta_{0,2}$$

som är förlustfaktorn uppmätt med  $0,2 \cdot U_N$  (spänning),

$$\frac{\tan \delta_{0,6} - \tan \delta_{0,2}}{2}$$

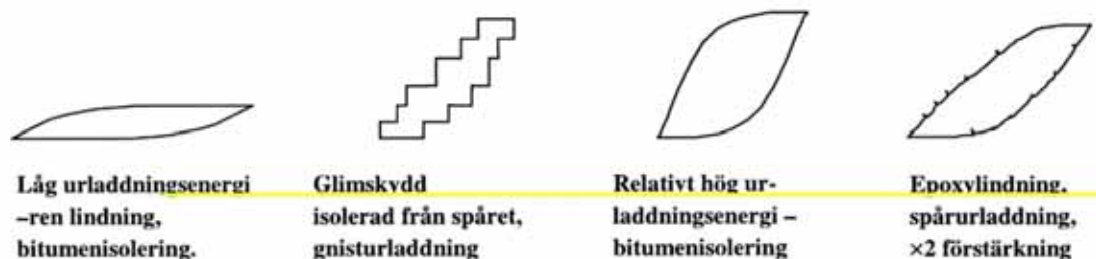
som är medelökningen av förlustfaktorn mellan  $0,2$  och  $0,6 \cdot U_N$  och

$$\Delta \tan \delta_{0,2 \max}$$

som är den största ökningen av förlustfaktorn när mätspänningen ändras med steg på  $0,2 \cdot U_N$  under mätintervallet  $0,2$  till  $1,0 \cdot U_N$ .

Ett högt begynnelsevärde av förlustfaktorn med en  $0,2$  gånger så stor märkspänning indikerar att isoleringen är smutsig och fuktig. En ökning av förlustfaktorn som en funktion av spänning tyder på håligheter inne i isoleringen och är ett tecken på åldring hos isoleringen. Endast lindningsisoleringens allmänna kondition kan klarläggas med hjälp av denna mätning, och därför måste lokaliseringen av fel göras med andra metoder. Förlustfaktormätning kan inte utföras tillförlitligt på generatorer vars plåtpaket är så kort att de halvledande skikten i härvändarna väsentligt påverkar mätresultaten.

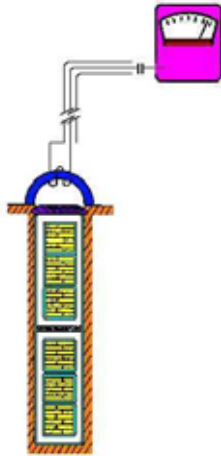
Mätningen av förlustfaktorn per intervall är en mätning som kompletterar  $\tan \delta$ -mätningen, då förlustfaktormätningen ger en ungefärlig lokalisering av fel, såsom tidigare nämndes. Arrangemangen för mätning av förlustenergi är i stort sett identiska med on-line-mätning, dock med den skillnaden att i fråga om förlustenergimätning är generatoren avställd under mätningen och växelspänningen ökas stegvis med intervallet  $0,2$  till  $1,0 \cdot U_N$ . Mätresultaten kan granskas även i form av slingkurvor över energi och spänning enligt Figur 2.3.3-32.



Figur 2.3.3-32. Slingkurva över förlustenergimätning med och utan svängningskrets.

Figure 2.3.3-32. Loop trace of dissipation energy measurement with and without oscillatory circuit.

Felen som upptäcktes vid mätningen av förlustenergin kan noggrannare lokaliseras vid spårspecifika mätningar av partiella urladdningar, då spänning matas till alla faser samtidigt eller till en fas medan de övriga är jordade. Mätningen görs med en induktiv givare och en radiostörningsmätare när frekvensen är 1 MHz. Urladdningar mäts från vardera spårändan och i mitten enligt Figur 2.3.3-33. Fel i ett begynnande stadium kan även lokaliseras med hjälp av mätningen, men detta kräver dock mätning med urløft rotor.



**Figur 2.3.3-33. Mätinstrument för mätning av partiell urladdning.**  
**Figure 2.3.3-33. Instrument for measure of partial discharge.**

Resultatet av mätning av partiell urladdning beror i hög grad på givarens läge och avstånd i förhållande till spåret och därför är det omöjligt att bestämma ett absolut mätvärde. Sålunda jämförs förlustnivåerna med tidigare mätningar och därigenom kan en förändring i den övergripande situationen upptäckas. Ett spårspecifikt fel lokaliseras genom att förlustnivån hos det skadade spåret jämförs med de andra spårens nivåer.

Under spänningsprovet belastas isoleringen med växelspanning som skadar den funktionellt svaga lindningsisoleringen. På så sätt kan otillförlitliga härvor ersättas på ett kontrollerat sätt, och fel som resulterar i servicestopp kan minimeras.

Provspanningarna hos gamla generatorer ligger vanligtvis kring  $1,0$  till  $1,5 \cdot U_N$ , och fabriksprovspanningen hos en ny generator är  $2 \cdot U_N + 1$  kV.

Spänningsprovet kan även utföras med likströmsspanning, vilket visserligen minskar elbehovet men å andra sidan inte ger lika tillförlitliga provresultat: i vissa fall har man noterat att isoleringen tålt likströmsspanningsprovet, men gett vika vid växelspanningsprovet. Den svagare belastningseffekten vid ett likströmsspanningsprov försöker man kompensera genom att öka provspanningen t.ex. upp till 1,7 gånger märkspanningen.

Graden av åldring hos lindningarna kan studeras noggrannare med hjälp av konditionsmätningar och inspektioner av provstavarna. Enbart en okulär inspektion av härvändarna räcker inte till för att säkerställa varv- och spårisoleringen på grund av att det i härvändarna råder fördelaktigare förhållanden vad gäller härvändarnas fältstyrka och temperatur än i spårlindningarna.



Provstavar tas alltid från en skadad generator och om möjligt i samband med modernisering. Mätningarna som görs på provstavar kan bedömas på samma sätt som i fråga om statorlindingarna, t.ex. enligt GEC:s konditionsbedömningskriterier. Graden och tidpunkten av underhåll, reparation och modernisering kan bedömas enligt samma kriterier.

#### 2.3.3.6.3 Återstående livslängd hos statorlindningar

Statorlindningens åldringsmekanismer är:

- Termisk åldring
- Elektrisk åldring
- Mekanisk åldring
- Åldring föranledd av förhållanden i omgivningen
- Kombinerad åldring

Bedömningen av statorlindningens livslängd grundas på kriterierna i **Bilaga B**. Generatorns huvudsakliga kondition bestäms nästan helt och hållet av statorlindningen. Utveckling och övervakning av konditionen sker utgående från regelbunden konditionsmätning. Föremålen för konditionsmätningen och inspektionerna framgår av Bilaga A.

#### 2.3.3.7 Magnetiseringssystem

Spänning och reaktiv effekt hos synkrogeneratorer justeras genom ändring av magnetiseringsströmmen. Magnetiseringsströmmen matas via ett magnetiseringssystem som består av magnetiseringsströmkälla, fältförsvagningsystem, spänningsregulator och nödvändig hjälputrustning. Syftet med magnetiseringssystemet är att hålla generatorns magnetisering inom fastställda gränser, reducera generatorsvängningar vid transienter och öka stabiliteten hos krafttransmissionssystemet.

Systemet mäter i regleringssyfte förändringar och derivator i spänningar, strömmar och frekvens. De mest avancerade automatiska reglersystemen kan även tillämpas för regleringsbegränsning och svåra styrningar av generatoren såsom synkronisering.

I dag finns det tre system för magnetisering av synkrogeneratorer:

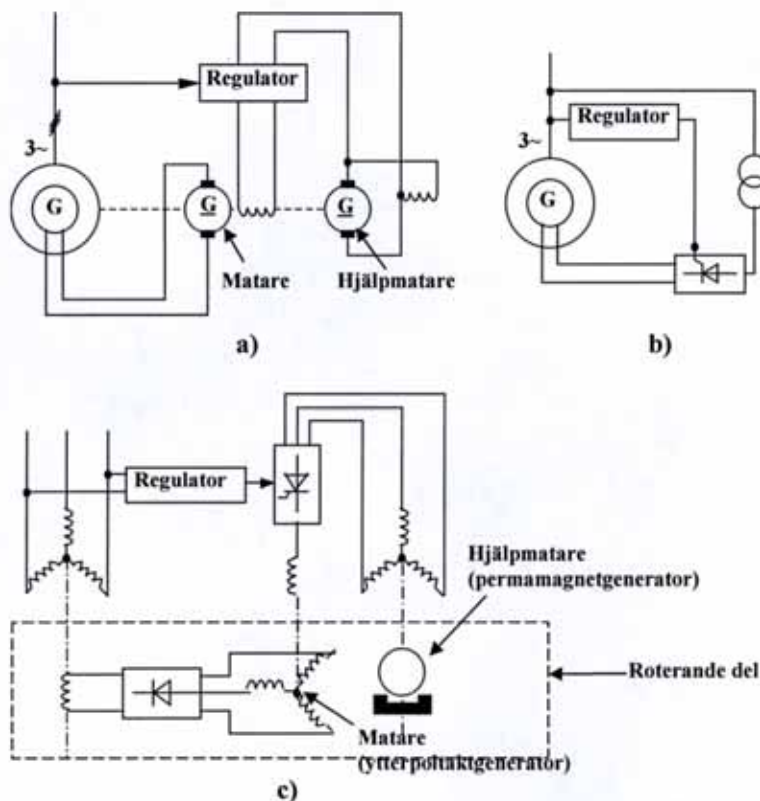
- Magnetisering med roterande magnetiseringsmaskin
- Statisk tyristormagnetisering
- Borstlös magnetisering

Tillverkningen av stora generatorer med roterande magnetiseringsmaskiner upphörde i slutet av 60-talet i och med lanseringen av tyristormagnetisering. I takt med utvecklingen av halvledare ersattes även roterande magnetiseringsmaskiner i mindre generatorer, men i detta fall med borstlös magnetisering grundad på roterande dioder. Problemen med roterande magnetiseringsmaskiner är det stora antal delar som är utsatta för slitning, t.ex. kommutator, borstar och släpringar som kräver service och måste bytas ut regelbundet. Antalet delar utsatta för slitning, behovet av utrymme och långsam reglering var sålunda orsakerna till att man frångick magnetisering med roterande magnetiseringsmaskin.

I statiska tyristormagnetiseringssystem som togs i bruk på 70-talet togs rotorkretsens magnetiseringsström från nätet med hjälp av en magnetiseringstransformator,

likriktare och regulatorer. De delar som utsätts för slitning i ett statiskt magnetiseringssystem är släpringarna och generatorborstarna.

I borstlösa magnetiseringssystem har släpringarna och borstarna ersatts av en växelspänningsmagnetiseringsmaskin som kopplats på generatorns axel. Magnetiseringsmaskinen är i själva verket en generator som magnetiseras från statorsidan. Statorlindningarnas växelström i magnetiseringsmaskinen likriktas med en roterande diodbrygga och matas i generatorns magnetiseringskrets. Den likriktade magnetiseringsströmmen hos magnetiseringsmaskinens statorlindningar produceras i sin tur med en så kallad hjälpmagnetiseringsmaskin (PMG), som magnetiseras med hjälp av permanenta magneter installerade i rotorn. Förenklat kan man säga att dessa två maskiners magnetiseringssystem är ett slags elektromekanisk förstärkare. Olika magnetiseringssystem presenteras i Figur 2.3.3-34.



Figur 2.3.3-34. Magnetisering med roterande magnetiseringsmaskin (a), statisk tyristormagnetiseringsmaskin (b) och borstlös magnetiseringsmaskin (c).

Figure 2.3.3-34. Excitation by a rotating exciter (a), a static thyristor exciter (b) and a brushless exciter (c).

#### 2.3.3.7.1 Skador i magnetiseringssystem

Skador och belastning på magnetiseringssystemet kan indelas i två grupper beroende på magnetiseringsmetoden: fel hos borstlösa och borstförsedda magnetiseringssystem. Oberoende av magnetiseringssystemet inverkar felen direkt på rotorkretsens och rotorlindningarnas funktion.

Skador på borstförsedda magnetiseringssystem är huvudsakligen en följd av slitage på delar såsom släpringar och borstar. Orsaken bakom skadorna och omfattande slitage är

vanligen vibrationer föranledda av att axeln är böjd, att släpringsytan är i dålig kondition och smutsig eller att fjädrarnas tryck på borstarna är ojämnt. Släpringarnas livslängd kan också minska beroende på fel kolkvalitet, kemikalier eller fukt i turbinhallens luft. Faktorerna nämnda ovan förorsakar gnistor mellan släpringarna och kolborstarna, vilket leder till att släpringarna slits ojämnt. De delar som är utsatta för slitage i roterande magnetiseringsmaskiner är utöver släpringarna kommutatorlameller, lamellernas lödställen och kolborstarna i lamellerna.

Borstlösa magnetiseringssystem är servicefria till skillnad från borstförsedda, men likriktarbryggornas halvledare är dock känsliga för överhettning. För att förhindra att komponenterna förstörs måste därför kylningen av tyristor- och diodbryggorna säkerställas noggrant. Halvledarkomponenternas livslängd kan bestämmas exakt som en funktion av temperaturen, och dessa livslängdskurvor gäller för alla halvledarkomponenter. Utgående från livslängdskurvor kan tillförlitliga serviceintervall bestämmas, varefter komponenterna i likriktarbryggorna byts ut mot nya.

Livslängdsbestämning av andra komponenter i likriktarbryggorna och regulatorerna är svårt. Sådana komponenter är t.ex. elektrolytkondensatorer, mekaniska reläer och härvor i magnetiseringsförstärkare. Generatorregulatorernas drift tryggas genom regelbundna konditionsmätningar.

#### 2.3.3.7.2 Provning av magnetiseringssystem

De typiska inspektionsobjekten i fråga om borstförsedd magnetiseringsutrustning är släpringar och borstar. Släpringar inspekteras med avseende på eventuellt slitage och kast. Kolborstarna inspekteras med avseende på korrekt spändhet (borsttryck).

Service av kolborstarna begränsas till utbyte av borstar och spänning av borstsystemet. Slitaget på släpringarna åtgärdas genom svarvning och slipning, och vid behov byts släpringarna ut mot nya under en översyn. Nötningen på släpringarna kan minskas genom att polariteten i magnetiseringen ändras då och då, dvs. ungefär med ett års intervall. Den effekt som en skev axel har på släpringen kan elimineras genom slipning och svarvning, ifall skevheten är liten. I annat fall måste axeln uppriktas på nytt.

Konditionen hos statorn och ankarna i likströmsmagnetiseringsmaskiner inspekteras med hjälp av isoleringsmotståndsmätning. Kommutatorns och kolborstarnas kondition inspekteras okulärt. Lödställena i kommutatorlamellerna inspekteras speciellt noggrant, eftersom där kan uppträda brända och smulna spår till följd av strömkommutering.

Den viktigaste metoden för konditionsövervakning som tillämpas på generatorer med statisk tyristormagnetisering är mätning av axelspänningen. Mätresultaten verifierar eventuell osymmetri i magnetiseringskretsen samt för stor jordkapacitans i växelspanningskretsens likriktarbryggor. Osymmetri tolkas som en ökning av den sjätte harmoniska spänningskomponenten, och jordkapacitans syns som högfrekventa spänningstoppar i axelspänningen. I samband med axelspänningsmätning skall även delar såsom likriktartyristorer, elektrolytkondensatorer och motstånden i spänningsdelningskretsen inspekteras eftersom de är sådana komponenter som slits ned i drift.

Komponenter som förstörs i borstlösa magnetiseringsmaskiner är huvudsakligen dioder i likriktarbryggan, vars kondition undersöks med hjälp av okulär inspektion och mätning. Skadade dioder byts ut mot nya. För att trygga diodernas funktion är det

viktigt att inspektera ventilationen i diodbryggorna och kontrollera filtrens kondition. Lindningarnas kondition i magnetiseringsmaskinen mäts och inspekteras i samband med att statorn och lindningarna i generatoren inspekteras.

#### 2.3.3.7.3 Återstående livslängd hos magnetiseringssystem

De viktigaste åldringsmekanismerna hos magnetiseringssystem är:

- Mekanisk åldring
- Elektrisk åldring
- Omgivningsrelaterad åldring
- Kombinerad åldring

Bedömningen av magnetiseringssystemens livslängd grundar sig på samma kriterier som bedömningen av magnetiseringslindningens livslängd. Den mekaniska åldringen är speciellt stark i maskiner med magnetiseringsborstar och därför är det viktigt med regelbunden övervakning av dessa maskiner. Utveckling och övervakning av konditionen sker utgående från regelbunden konditionsmätning. Föremålen för övervakningsmätningar framgår av **Bilaga A**.

## Bilaga A

### Övervakning av generatorns kondition Fortumkoncernens rekommendationer

| Inspektionsobjekt                                                                 | Underhållsperiod |            |            |             | Not<br>e |
|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------|------------|------------|-------------|----------|
|                                                                                   | A                | B          | C          | D           |          |
|                                                                                   | 1..2<br>år       | 2..3<br>år | 4..6<br>år | 8..12<br>år |          |
| <b>Diagnostisk provning av lindningsisoleringen i en stator (DTSI)</b>            |                  |            |            |             |          |
| Mätning av partiella urladdningar, On Line                                        | x                | x          | x          | x           |          |
| Mätning av isoleringsmotstånd                                                     | x                | x          | x          | x           |          |
| Mätning av lindningsmotstånd                                                      |                  |            | x          | x           |          |
| Mätning av förlustfaktorn som en funktion av spänningen (tand)                    |                  |            | x          | x           |          |
| Mätning av partiell urladdningsenergi som en funktion av spänningen               |                  |            | x          | x           |          |
| Spårvis mätning av partiell urladdning                                            |                  |            |            | x           |          |
| Spänningsprov                                                                     |                  |            |            | x           |          |
| Laboratorieundersökning av provhärva (lamell)                                     |                  |            |            |             | 1        |
|                                                                                   |                  |            |            |             |          |
| <b>Diagnostisk provning av rotorlindningsisoleringen (DTRI)</b>                   |                  |            |            |             |          |
| Mätning av axelspänningen, frekvensanalys                                         | x                | x          | x          | x           |          |
| Mätning av isoleringsmotstånd                                                     | x                | x          | x          | x           |          |
| Mätning av lindningsmotstånd                                                      |                  | x          | x          | x           |          |
| Mätning av impedans och isoleringsmotstånd som en funktion av rotationsfrekvensen |                  | x          | x          | x           |          |
| Impedansmätning som en funktion av strömmen                                       |                  | x          | x          | x           |          |
| Högspänningsprov                                                                  |                  |            |            | x           |          |
| Polvis impedansmätning (endast generatorer med utpräglade poler)                  |                  |            |            | x           |          |
| Polvis stötmätning? (endast generatorer med utpräglade poler)                     |                  |            |            | x           |          |
|                                                                                   |                  |            |            |             |          |
| <b>Diagnostisk provning av plåtpaketets isolering (DTCI)</b>                      |                  |            |            |             |          |
| Kärnprov på plåtpaketet                                                           |                  |            |            | x           |          |
|                                                                                   |                  |            |            |             |          |
| <b>Funktionsprov på skyddsutrustning (FTPR)</b>                                   |                  |            |            |             |          |
| Inspektion av matningsspänning                                                    | x                | x          | x          | x           |          |
| Inspektion av mättransformator-krets                                              |                  | x          | x          | x           |          |
| Inspektion av larmkretsar                                                         |                  | x          | x          | x           |          |
| Inspektion av utlösningsskretsar                                                  |                  | x          | x          | x           |          |
| Sekundärprov på reläer                                                            |                  | x          | x          | x           |          |
| Primärprov på reläer                                                              |                  |            |            |             | 2        |
|                                                                                   |                  |            |            |             |          |
| <b>Funktionsprov av magnetisering (FTEX)</b>                                      |                  |            |            |             |          |

| Inspektionsobjekt                                                         | Underhållsperiod |            |            |             | Not<br>e |
|---------------------------------------------------------------------------|------------------|------------|------------|-------------|----------|
|                                                                           | A                | B          | C          | D           |          |
|                                                                           | 1..2<br>år       | 2..3<br>år | 4..6<br>år | 8..12<br>år |          |
| Inspektion av matningsspänning                                            | x                | x          | x          | x           |          |
| Inspektion av mättransformator-kretsar                                    |                  | x          | x          | x           |          |
| Inspektion av larmkretsar                                                 |                  | x          | x          | x           |          |
| Inspektion av utlösning-kretsar                                           |                  | x          | x          | x           |          |
| Sekundärprov på vakter och skyddsreläer                                   |                  | x          | x          | x           |          |
| Inspektion av styrkretsar                                                 |                  |            |            | x           |          |
| Inspektion av huvudkomponenter genom mätning                              |                  |            |            | x           |          |
| Funktionsprov för generatorer utan last                                   |                  |            |            | x           |          |
| Funktionsprov för generatorer under last                                  |                  |            |            | x           |          |
|                                                                           |                  |            |            |             |          |
| <b>Funktionsprov av synkroniseringen (FTSY)</b>                           |                  |            |            |             |          |
| Inspektion av matningsspänning                                            | x                | x          | x          | x           |          |
| Inspektion av mättransformator-kretsar                                    |                  |            |            | x           |          |
| Inspektion av styrkretsar                                                 |                  |            |            | x           |          |
| Sekundärprov på automatisk synkroniseringsutrustning                      |                  |            |            | x           |          |
| Primärprov på automatisk synkroniseringsutrustning                        |                  |            |            | x           |          |
|                                                                           |                  |            |            |             |          |
| <b>Diagnostiska inspektioner av statorstommen och plåtpaketet (DISFC)</b> |                  |            |            |             |          |
| Okulär inspektion av statorstommens kondition och renhet                  |                  | x          | x          | x           |          |
| Okulär inspektion av statorstommens täthet                                |                  |            | x          | x           |          |
| Inspektion av plåtpaketets täthet med knivtest                            |                  |            |            | x           |          |
| Inspektion av plåtpaketets täthet med avknackningsprov                    |                  |            |            | x           |          |
| Okulär inspektion av lindningar och kilning                               |                  |            |            | x           |          |
| Inspektion av lindningar och kilning med avknackningsprov                 |                  |            |            | x           |          |
|                                                                           |                  |            |            |             |          |
| <b>Diagnostisk inspektion av navet och återhållarringarna (DIRBR)</b>     |                  |            |            |             |          |
| Okulär inspektion av kommutatorer                                         | x                | x          | x          | x           |          |
| Okulär inspektion av nav, lindningar och kilning                          |                  |            | x          | x           |          |
| Endoskopiinspektion av härvändar och spår                                 |                  |            | x          | x           |          |
| Penetrantgranskning av återhållarringar                                   |                  |            |            | x           |          |
| Ultraljudsmätning av återhållarringar                                     |                  |            |            | x           |          |
| Penetrantgranskning och avknackningsprov på fläktvingarna                 |                  |            |            | x           |          |
| Penetrantgranskning av släpringarna                                       |                  |            |            | x           |          |
|                                                                           |                  |            |            |             |          |
| <b>Diagnostiska inspektioner av lager och axeltätningar (DIBS)</b>        |                  |            |            |             |          |
| Penetrantgranskning av lager                                              |                  |            | x          | x           |          |
| Ultraljudsmätning av lager                                                |                  |            | x          | x           |          |

| Inspektionsobjekt                                                     | Underhållsperiod |            |            |             | Not<br>e |
|-----------------------------------------------------------------------|------------------|------------|------------|-------------|----------|
|                                                                       | A                | B          | C          | D           |          |
|                                                                       | 1..2<br>år       | 2..3<br>år | 4..6<br>år | 8..12<br>år |          |
| Penetrantgranskning av axeltätningar                                  |                  |            | x          | x           |          |
| Mätning av spel i axeltätningar                                       |                  |            | x          | x           |          |
|                                                                       |                  |            |            |             |          |
| <b>Diagnostiska inspektioner av värmeväxlare och gaskylare (DIHG)</b> |                  |            |            |             |          |
| Okulär inspektion av värmeväxlare och kylare                          | x                | x          | x          | x           |          |
| Virvelströmsmätning i värmeväxlare och kylare                         |                  |            | x          | x           |          |
| Tryckprovning av värmeväxlare och kylare                              |                  |            | x          | x           |          |
|                                                                       |                  |            |            |             |          |

A Årlig översyn med intervall på 6 000 till 10 000 ekvivalenta drifttimmar.

B Regelbunden inspektion med intervall på 2 till 3 år, under vilken skyddsutrustning och styrkretsar inspekteras.

C Regelbunden översyn med intervall på 20 000 till 30 000 ekvivalenta drifttimmar.

D Första översyn 1 till 2 år efter drifttagningen och större översyn med intervall på 40 000 till 60 000 ekvivalenta drifttimmar, med rotern utlyft ur generatorn.

(1) Vid skador och i situationer där undersökning av isoleringens aktuella kondition önskas.

(2) Vid drifttagning och i samband med moderniseringar.



## Bilaga B

**TABELL 1. UNDERLAG FÖR BEDÖMNING AV EN MASKINS KONDITION**

### 1. Okulär inspektion

- Registrera härvändisoleringens kondition
- Kontrollera kilning, tätning och stöttning
- Tecken på eventuell förorening, typ och mängd

### 2. Utgångskriterierna granskade

- DC-isoleringsmotståndet, 1 min. värde
- Polarisationsindex
- AC-isoleringsmotstånd R, DLA
- AC-kapacitans C, DLA
- Beräkna  $\tan\delta = 1/\omega RC$  vid  $0,2 \cdot U_{\Delta}$  ( $0,2$ -nominell ledningsspänning).
- Beräkna  $\Omega F$ -värdet ( $M\Omega \cdot \mu F$ ).
- Beakta DLA slingkurva vid  $U_y$  (fasspänning),  $0,8 \cdot U_{\Delta}$  och  $U_{\Delta}$ .
- Registrera slingkurvytor och beräkna de integrerade energivärdena vid  $U_{\Delta}$  och  $U_y$  ( $E_{1,0}$  och  $E_{0,6}$ )
- Mät kapacitansen C och  $\tan\delta$  vid  $0,2$ ;  $0,4$ ;  $0,6$ ;  $0,8$  och  $1,0 \cdot U_{\Delta}$ .
- Beräkna  $\tan\delta_{1,0} - \tan\delta_{0,2}$  och  $D\tan\delta_{0,2max}$  (max.  $\Delta\tan\delta$  mellan  $0,2-0,4$ ,  $0,4-0,6$ ;  $0,6-0,8$  och  $0,8-1,0 \cdot U_{\Delta}$ ).

### 3. Jämför de erhållna resultaten med data från liknande lindningar och med eventuella tidigare resultat. Se Tabeller II, III och IV.

**TABELL 2. VARIATIONSBREDD FÖR VÄRDEN PÅ TYPISKA KONDITIONSKRITERIER – FÖR ALLA ISOLERINGSSYSTEM**

| Kriterium                             | 13+ kV |         | 8 - 12,9 kV |         |
|---------------------------------------|--------|---------|-------------|---------|
| IR ( $M\Omega$ )                      | 125    | - 1500  | 17          | - 18000 |
| PI                                    | 1,5    | - 6,0   | 1,0         | - 7,7   |
| $\Omega F$ ( $M\Omega \cdot \mu F$ )  | 113    | - 902   | 1,9         | - 2753  |
| C ( $\mu F$ )                         | 0,63   | - 1,67  | 0,25        | - 1,45  |
| $E_{0,6}$                             | 0,10   | - 12,50 | 0,05        | - 11,30 |
| $E_{1,0}$                             | 3,2    | - 62,2  | 2,5         | - 70,0  |
| $\tan\delta_{0,2}$                    | 0,015  | - 0,061 | 0,008       | - 0,175 |
| $\tan\delta_{1,0} - \tan\delta_{0,2}$ | 0,003  | - 0,053 | 0,007       | - 0,187 |

**TABELL 3. RELATIV BETYDELSE AV KONDITIONSÖVERVAKNING OCH  
GENERATORDRIFT FÖR GENERATORNS LIVSLÄNGD**

| <b>Faktor</b>        | <b>Viktning</b> |
|----------------------|-----------------|
| Okulär inspektion    | ≤ 20 %          |
| Driftförhållanden    | ≤ 10 %          |
| Omgivningsförh.      | ≤ 10 %          |
| Historiska förh.     | ≤ 10 %          |
| Elektriska mätningar | resten av 100 % |

## MERITVÄRDERINGSSYSTEM

Mätningarna väljs så att de kan utnyttjas under översyner för att omfattande bedöma isoleringens kondition utan att isoleringen skadas.

Resultaten av de enskilda mätningarna indelas i meritvärden ( $MR = 1 \dots 10$ ). Resultatet vägs med hjälp av empiriska viktningsfaktorer ( $WF = 1 \dots 3$ ) som lyfter fram några mätresultat, tabell 5. En total meritvärdering (Overall Merit Rating, OMR) beräknas från summan av produkterna av meritvärdena och viktningsfaktorena.

$$OMR = \frac{\sum MF \times WF}{10}$$

OMR hos en ny statorisolering är mindre än 3. Benägenheten för skador är hög då  $OMR = 6 \dots 7$ .

Meritvärderingssystemet är grundat på antagandet att en generators livslängd huvudsakligen beror på statorisoleringens kondition, och det berör såtillvida inte mekaniska skador.

**TABELL 4. ISOLERINGSSKADOR INDIKERADE AV MÄTNINGAR SOM MOTSVARAR KRITERIERNA**

|     |                                                                                                                                                                                                        |
|-----|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| I   | Indikerar kondition, renhet och torrhet.                                                                                                                                                               |
| II  | Förmedlar inverkan av ledning förknippad med belastningsfördelningen, nedsmutsning och förändringar till följd av termisk åldring.                                                                     |
| III | Slingkurvan beskriver urladdningsmönstret per cykel, och området genererar den integrerade urladdningsenergin nivå som härvändorna utsätts för.                                                        |
| IV  | Slingkurvytan är proportionellt till det totala tomrumsinnehållet. Som sådant reflekterar det förändringar i den strukturella integriteten till följd av kumulativ belastning.                         |
| V   | Förändringen i $\tan\delta$ enligt belastningen härstammar från det icke-linjära ledningsfenomenet hos en fast isolering, ökad förlust till följd av partiell urladdning i konstruktionens håligheter. |

**TABELL 5. VIKTNINGSFAKTORER FÖR KONDITIONSKRITERIERNA**

| Krit. nr | Kriterier                             | Viktnings-Faktor [WF] |
|----------|---------------------------------------|-----------------------|
| I        | $\Omega F$ ( $M\Omega \cdot \mu F$ )  | 1                     |
| II       | $\tan\delta_{0,2}$                    | 1                     |
| III      | $E_{0,6}$                             | 3                     |
| IV       | $E_{1,0}$                             | 3                     |
| V        | $\tan\delta_{1,0} - \tan\delta_{0,2}$ | 2                     |

| MR    | Kriterium I                      | Kriterium II       | Kriterium III                      | Kriterium IV | Kriterium V                                     |               |
|-------|----------------------------------|--------------------|------------------------------------|--------------|-------------------------------------------------|---------------|
|       | $\Omega F (M\Omega \cdot \mu F)$ | $\tan\delta_{0,2}$ | $E_{0,6}$<br>$E (\mu J/pF/period)$ | $E_{1,0}$    | $\tan\delta_{1,0} - \tan\delta_{0,2}$<br>13+ kV | 8...12,9 kV   |
| 1     | 2000+                            | 0 - 0,009          | 0 - 1,0                            | 0 - 5,0      | 0 - 0,0050                                      | 0 - 0,010     |
| 2     | 1210 - 1999                      | 0,010 - 0,014      | 1,1 - 2,0                          | 5,1 - 10,0   | 0,0051 - 0,0100                                 | 0,011 - 0,020 |
| 3     | 785 - 1209                       | 0,015 - 0,019      | 2,1 - 3,0                          | 10,1 - 15,0  | 0,0101 - 0,0150                                 | 0,021 - 0,030 |
| 4     | 510 - 784                        | 0,020 - 0,026      | 3,1 - 4,0                          | 15,1 - 20,0  | 0,0151 - 0,0200                                 | 0,031 - 0,040 |
| 5     | 350 - 509                        | 0,027 - 0,035      | 4,1 - 5,0                          | 20,1 - 25,0  | 0,0201 - 0,0250                                 | 0,041 - 0,050 |
| 6     | 240 - 349                        | 0,036 - 0,049      | 5,1 - 6,0                          | 25,1 - 30,0  | 0,0251 - 0,0300                                 | 0,051 - 0,060 |
| 7     | 165 - 239                        | 0,050 - 0,069      | 6,1 - 7,3                          | 30,1 - 36,0  | 0,0301 - 0,0350                                 | 0,061 - 0,070 |
| 8     | 105 - 164                        | 0,070 - 0,105      | 7,4 - 8,9                          | 36,1 - 43,0  | 0,0351 - 0,0420                                 | 0,071 - 0,085 |
| 9     | 50 - 104                         | 0,106 - 0,190      | 9,0 - 11,4                         | 43,1 - 54,0  | 0,0421 - 0,0520                                 | 0,086 - 0,105 |
| 10    | 0 - 49                           | 0,191+             | 11,5+                              | 54,1+        | 0,0521+                                         | 0,106+        |
| WF    | 1                                | 1                  | 3                                  | 3            | 2                                               | 2             |
| MR·WF |                                  |                    |                                    |              |                                                 |               |
| OMR   |                                  |                    |                                    |              |                                                 |               |

**EXEMPEL** 11 kV generatorns (byggd 1949, schellack-glimmerfolieisolering) kondition bedömdes utgående från konditionsövervakningsmätningarna nedan. Resultaten indikerade en risk för plötslig skada, varpå omedelbar omlindning rekommenderades. Maskinen skadades några månader efter mätningarna - innan de nödvändiga åtgärderna vidtagits.

| Uppgifter om generatorn:          | Kriterier                             | Mätvärde | MR·WF    |
|-----------------------------------|---------------------------------------|----------|----------|
| $U_N = 11 \text{ kV}$             | $\Omega F (M\Omega \cdot \mu F)$      | 275      | 6        |
| $C = 1,18 \text{ } \mu F$         | $\tan\delta_{0,2}$                    | 0,037    | 6        |
| $R_e = 233 \text{ M}\Omega$       | $E_{0,6}$                             | 8,1      | 27       |
|                                   | $E_{1,0}$                             | 54       | 27       |
|                                   | $\tan\delta_{1,0} - \tan\delta_{0,2}$ | 0,091    | 18       |
|                                   |                                       |          | <hr/> 84 |
| Total meritvärdering (OMR)        | 8,4                                   |          |          |
| Driftår                           | 29                                    |          |          |
| Lindningens och plåtkärnans skick | Tecken på frätning                    |          |          |
| Total tillförlitlighet            | Risk för plötslig skada               |          |          |

## 2.4 MATARVATTENANLÄGGNINGAR

### 2.4.1 Matarvattentankar

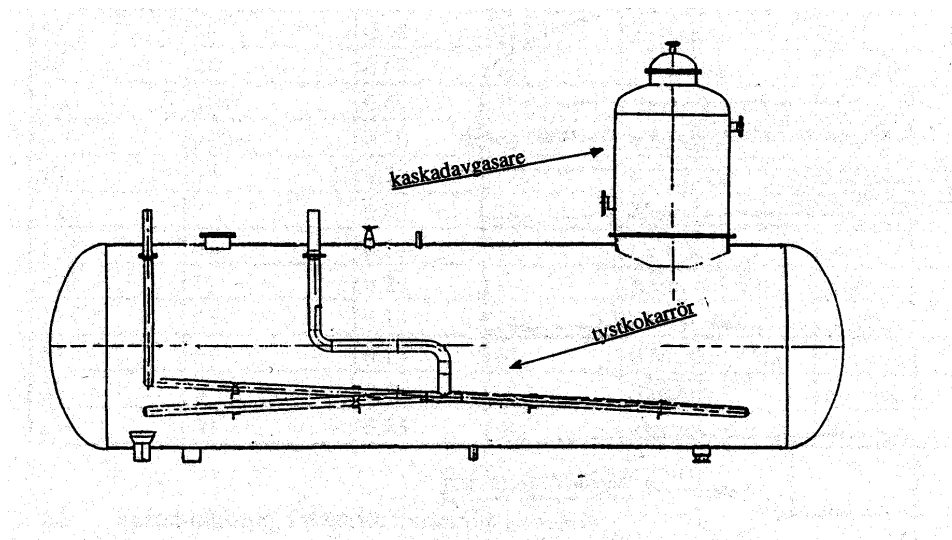
#### *Funktion*

Matarvattentanken har flera funktioner. Den utgör dels ett förråd av vatten till en panna och dels fungerar den som ett uppvärmningssystem. Ånga används för uppvärmningen. Temperaturen i en matarvattentank är oftast mellan 100 och 180 °C. Trycket i tanken varierar mellan 2 och 20 bar. En annan viktig funktion är den termiska eller mekaniska avgasningen, d.v.s. avdrivningen av löst syre, kväve och kolsyra. Avgasare behandlas i ett separat kapitel.

Matarvatten är det vatten som används för matning av en panna. Det utgörs av kondensat och spädvatten. Kondensatet är en del av i pannan genererad ånga som efter användning återförs i form av vatten till matarvattenbehållaren. Spädvattnet (make-up) är det vatten som man måste tillföra systemet för att ersätta den del av kondensatet som inte återförs till matarvattenbehållaren. Spädvatten och kondensat bildar tillsammans matarvatten. Blandningen sker oftast i matarvattentanken. Inloppen för spädvatten och kondensat till matarvattentanken ska vara belägna så att avgasning kan ske. Spädvattnets kvalitet har bearbetats i filterutrustningar anpassade efter de krav som ställs för den aktuella anläggningen.

#### *Konstruktion*

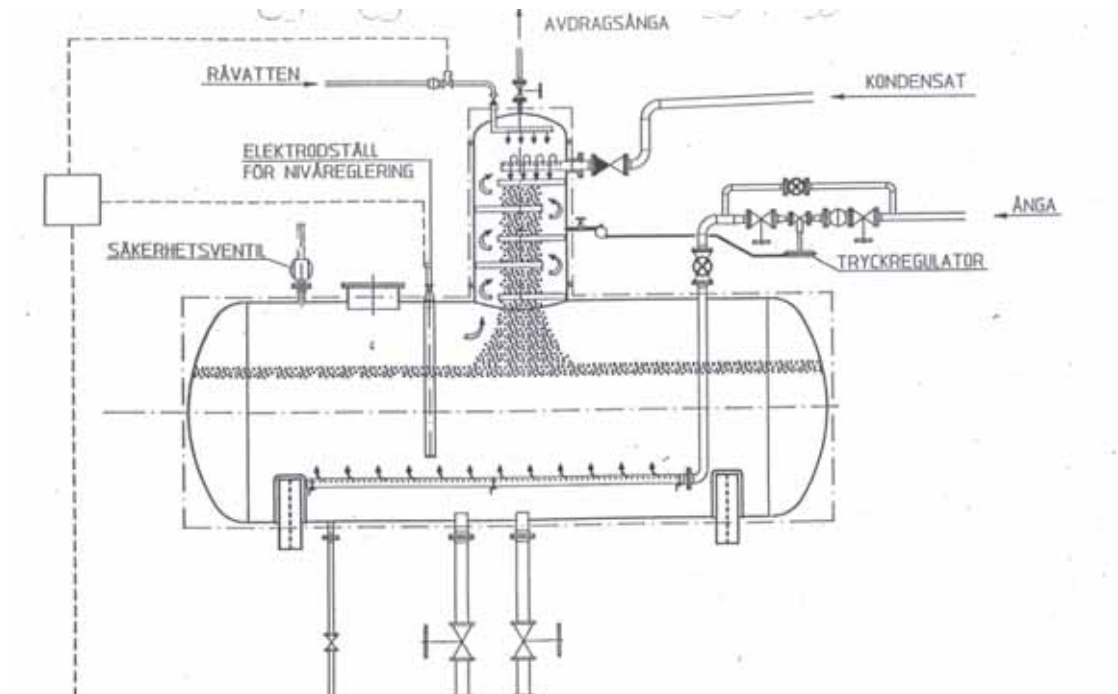
Den vanligaste typen av matarvattentank är den med tystkokarrör och kaskadavgasare, se Figur 2.4-1. I avgasaren finns plåtar som finfördelar vattnet, kaskadplåtar. Vattnet faller i droppform från plåt till plåt och uppvärms via den omgivande ångan i avgasaren. Ångan tillförs nära botten i matarvattentanken via ett så kallat tystkokarrör. Röret är snedställt för att undvika "ångsmällor". Matarvattentanken är till en del fylld med vatten, ofta omkring halva volymen, resterande volym är under drift fylld med ånga.



Figur 2.4-1. Typisk matarvattentank med kaskadavgasare och tystkokarrör.

Figure 2.4-1. Typical feedwater storage vessel with deaerator.

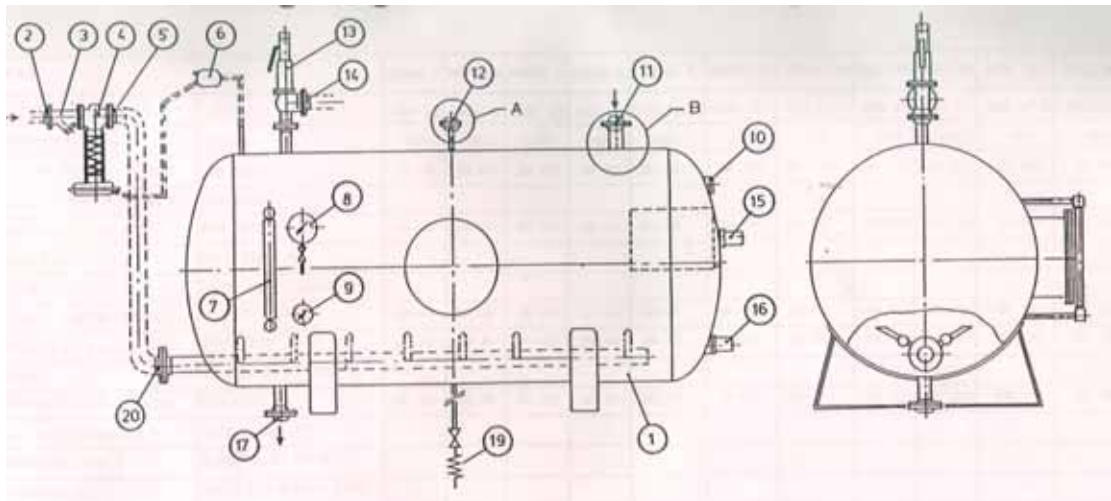
En annan variant av denna matarvattentank visas i Figur 2.4-2 nedan. I detta fall finns avgasaren mitt på matarvattentanken.



**Figur 2.4-2. Matarvattentank med kaskadavgasare och tystkokarrör.**

**Figure 2.4-2. Feed water tank vessel with deaerator.**

En annan typ av matarvattentank med inbyggd avgasare framgår av Figur 2.4-3. I detta fall blandas kondensat och spädvatten så att temperaturen blir minst 60 °C innan det leds till toppen av avgasaren. Ett spraymunstycke sprayar vattnet på ett sätt som gör det möjligt att frigöra gaserna (syre och kolsyra) från vattnet. Ånga leds till botten av avgasaren genom en tryckreduceringsventil och en ånginjektor skapar den nödvändiga turbulensen i vattnet för en effektiv avgasning. De avgående gaserna leds ut i det fria via ett utluftningsrör.



**Figur 2.4-3. Matarvattentank med inbyggd avgasare.**

**Figure 2.4-3. Feed water tank with deaerator.**

### *Material*

De material som förekommer i matarvattentankar är kolmangan-, mikrolegerade och låglegerade stål. Materialen är listade i Tabell 2.4-1 nedan. Vanligtvis kan ordinära tryckkärlsstål såsom EN-stål P235 och P265 (motsvarande SS-stål 1330 respektive 1430) väljas, men även mikrolegerade stål av typen OX 520. Stålet OX 540 med höga niobhalter, är generellt godkänt som tryckkärlsstål. Stålet har dock dragits in av levererade stålföretag på grund av små leveransposter och dålig lönsamhet. Weldox 500 är ett extra höghållfaststål som används framförallt i större matarvattentankar då låg vikt är ett strängt krav. Finkornstålen SS-stål 2101, 2103 och 2106 har tidigare valts som material i komponenten, men dessa stål används inte längre, eftersom stålen är känsliga för sprickbildning. De låglegerade stålen A 533-B och A 508 är material för reaktorinneslutningar till kärnkraftverk, men kan användas till matarvattentankar. Ibland har något udda varianter förekommit i matarvattentankar såsom Domex, Fortiweld och Corten material.



Tabell 2.4-1 Hållfasthet hos olika stålsorter som har använts i matarvattentankar.

| Huvudgrupp             | Stålgrupp     | Material      | Sträckgräns<br>$R_{el}$ (MPa) | Brottgräns<br>$R_m$ (MPa) | Förlängning<br>$A_5$ (%) |
|------------------------|---------------|---------------|-------------------------------|---------------------------|--------------------------|
| Ordinära stål          | Kolmangan     | SS-stål 1330  | 220                           | 360-480                   | 26                       |
| Ordinära stål          | Kolmangan     | SS-stål 1430  | 260                           | 410-530                   | 24                       |
| Höghållfast stål       | Kolmangan     | SS-stål 2101  | 310                           | 470-590                   | 21                       |
| Höghållfast stål       | Kolmangan     | SS-stål 2103  | 310                           | 470-590                   | 21                       |
| Höghållfast stål       | Låglegerade   | ASME SA 508   | 345                           | 550-725                   | 18                       |
| Höghållfast stål       | Låglegerade   | ASME SA 533-B | 345                           | 550-690                   | 18                       |
| Höghållfast stål       | Mikrolegerade | OX 520        | 350                           | 510-650                   | 22                       |
| Höghållfast stål       | Mikrolegerade | SS-stål 2106  | 350                           | 500-640                   | 22                       |
| Höghållfast stål       | Mikrolegerade | OX 540        | 390                           | 530-650                   | 20                       |
| Extra höghållfast stål | Mikrolegerade | Weldox 500    | 490                           | 610-760                   | 16                       |
| Extra höghållfast stål | Mikrolegerade | Domex 400     | 500                           | 530-640                   | 22                       |
| Extra höghållfast stål | Låglegerade   | Fortiweld     | 500                           | 590-620                   | 18                       |

### Materialval

Vid materialvalet skall sträckgräns, kemisk sammansättning och föroreningshalten (svavel) i stålet beaktas. Överhuvudtaget bör inte 21+-stålen användas som material i komponenten och det är sedan länge förbjudit att använda Fortiweld som material. SS-stål 21 06 är inte godkänt som tryckkärlsstål. Anmärkningsvärt är att OX 520 och OX 540 uppvisar en stor tendens till sprickbildning. OX 540 har högre hållfasthet än OX 520. Ståltillverkaren har dragit in förstnämnda stålet, bl.a. eftersom det innehåller höga niobhalter och är svårt att svetsa. Det finns inga material som är riskfria beträffande sprickbildning. Stor betydelse har tillverkningsproceduren, d v s att objekten svetsas på ett optimalt sätt och att avspänningsglödning tillämpas. Material med relativt hög hållfasthet är generellt sett mer sprickkänsliga.

### Svetsprocedurer

Innan svetsning skall en svetsprocedur upprättas och denna skall godkännas av ett kontrollföretag. Svetsutförandet är mycket viktigt ur sprickbildningssynpunkt.

### Avspänningsglödning

För att minska risken för sprickbildning i matarvattentankar bör dessa avspänningsglödgas. Enligt Svensk standard SS 064510 talas det om "att

avspänningsglödning skall ske för behållare med godstjocklek  $t > 20 \text{ mm}$ . För material med  $\text{ReL} \geq 300 \text{ MPa}$  är gränsen  $t > 6000 / \text{ReL}$ . För material och svetsar med slagseghetskrav enligt stålstandard uppfyllda vid  $-20 \text{ °C}$  fordras dock avspänningsglödning först vid godstjocklekar  $> 32 \text{ mm}$ .  $\text{ReL}$  är mätetalet för grundmaterialets garanterade sträckgräns i MPa enligt stålstandarden. Avspänningsglödning skall dessutom utföras på komponenter, som kan antas bli utsatta för allvarlig korrosion, t ex spänningskorrosion.

Avspänningsglödning bör ske på nytillverkade matarvattentankar, där så är möjligt. I stora tankar kan avspänningsglödning ske lokalt på svetsar som senare kommer att vara belägna i gasfasen. Längsgående svetsar bör placeras i den övre delen som står i kontakt med ånga och inte i den undre som står i kontakt med vatten, för att minska risken för sprickbildning. Detta eftersom sprickbildning är vanligare i vätskedelen.

#### 2.4.1.1 Skador på Matarvattentankar

##### *Sprickbildning*

Typiska skademekanismer för matarvattentankar är miljöbetingad sprickbildning (spänningskorrosion, töjningsinducerad korrosionssprickning och korrosionsutmattnings). Miljöbetingad sprickbildning uppkommer genom samverkan mellan mekaniska spänningar och korrosion. Utgör spänningarna statiska dragspänningar, talar man om spänningskorrosion; är de däremot växlande, kallas processen korrosionsutmattnings. De utredningar som utförts tyder på att sprickorna uppkommer och propagerar genom en kombination av utmattnings och korrosion, s.k. korrosionsutmattnings, ref [1]. Töjningsinducerad korrosionssprickning (SICC) är en tredje typ som är kopplad till lågfrekvent lastcyklings i kombination med höga spänningsnivåer och förhöjd syrehalt i vattnet.

Statistik från Inspectas besiktningsdatabas har använts för sökning efter matarvattentankar med sprickbildning, ref [1]. Antalet matarvattentankar totalt i databasen var 1019 st. Av dessa hade 200 st sprickbildning och korrosionsskador, vilket utgjorde 19,6 % av underlaget.

De flesta sprickor har förekommit i omedelbar närhet till invändiga svetsar. Områden där sprickor har förekommit var i rundgående svetsar, speciellt mellan gavlar och cylindriska delar, längsgående svetsar, svetsar vid stutsar, svetsar mellan avgasare och matarvattentank, svetsar mellan avgasarens mantel och invändiga bafflar, förstärkningsringar och områden med höga spänningskoncentrationer.

Majoriteten av de iakttagna sprickorna har funnits i området under vattenlinjen. Sprickorna är oftast raka, ej förgrenade samt transkristallina. Sprickspetsen kan vara trubbig, uppvisar korrosion och fylld med oxider. En typisk spricka visas i Figur 2.4-4 och 2.4-5. I det här fallet är det fråga om en spänningskorrosionsspricka.



**Figur 2.4-4.** Tvärspricka i rundsvets mot gavel.

**Figure 2.4-4.** Crack across the circumferential weld towards the gable.



**Figur 2.4-5.** Metallografiskt tvärsnitt av tvärsprickan i rundsvetsen.

**Figure 2.4-5.** Metallographic cut of the crack across the weld.

### *Gropfrätning*

I många av de undersökta matarvattentankarna har frätgropar iakttagits, ref [1]. I vissa fall kan vätskeberörda delar i matarvattentanken ha frätgropar där ett djup upp till 4 mm har uppmätts.

Ofullständig avgasning av vattnet i matarvattentanken kan leda till gropfrätning orsakad av syrekorrosion. Gropfrätning kan i sin tur leda till sprickbildning. Vid avställning kan höga syrehalter i vattnet förekomma i systemet, vilket signifikant påskyndar gropfrätningen. Det är också möjligt att den skyddande oxidfilmen (magnetiten) kan brytas sönder, företrädesvis vid spänningskoncentrationer och att detta följs av gropfrätning på exponerad metallens yta.

*Faktorer som påverkar sprickbildning på komponenten*

De vanligaste faktorerna som påverkar skador på komponenten är listade i Tabell 2.4-2 nedan.

**Tabell 2.4-2 Inverkande faktorer som styr sprickbildningen i matarvattentankar.**

| Faktor          | Skadefall och erfarenheter                                                                                                                                                                                                                                                |
|-----------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Syrehalt        | Den lösta syrehalten i vattnet har den avgörande betydelsen för sprickbildning.                                                                                                                                                                                           |
| Temperatur      | Stål är känsligt för spänningskorrosion och töjningsinducerad korrosionssprickning (SICC) i vatten vid temperaturer över 100 °C. Från besiktningsdatabasen har det även påvisats att vid höga temperaturer ökar andelen spruckna objekt.                                  |
| Tryck           | Vid ett ökat tryck i tanken ökar risken för sprickbildning.                                                                                                                                                                                                               |
| Material        | 1330 är mindre sprickkänslig än 14 30, vilken är mindre sprickkänslig än OX 520. Sprickkänsligast är 21 03. Finkornstål av typen 21 ++ är mycket känsliga för sprickbildning, medan ordinära stål av typen 1330 är mindre känsliga. Föroreningshalten i stålet är viktig. |
| Svetsutförande  | Svetsdefekter och ej avspänningsglödgade svetsar ökar risken för sprickbildning.                                                                                                                                                                                          |
| Cykliska laster | Cykliska laster som uppstår i matarvattentankarna kan ha flera orsaker. Majoriteten har rapporterats från "vattenhammare", som är resultat av en blandning av varmt och kallt vatten. Vibrationer från matarvattenpumparna kan orsaka sprickbildning.                     |
| Föroreningar    | Skadefall har bekräftat att föroreningar i matarvattnet kan leda till sprickbildning i matarvattentankar. Föroreningar som klorider och sulfater, förutom syre, har störst negativ inverkan.                                                                              |
| Oxidfilm        | Viktigt att en skyddande oxidfilm av magnetit ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) erhålls vid idrifttagande.                                                                                                                                                                      |
| Ålder           | Objekt tillverkade mellan 1970 – 80 uppvisar flest skador. Frekvent användning av sprickkänsliga material i kombination med ålder är en trolig förklaring till detta.                                                                                                     |

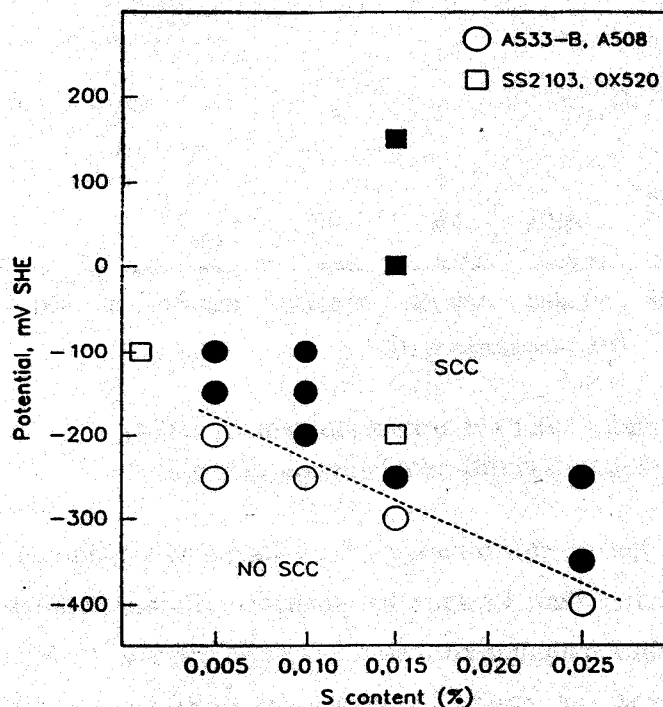
Uppenbart är att den lösta syrehalten i vattnet utgör den största påverkande faktorn för sprickbildning. Halten löst syre i vattnet och hur det avleds har en avgörande betydelse för sprickbenägenheten. En stor betydelse för sprickbildning är också avgasarens funktion och var någonstans den är placerad i matarvattentanken.

Från besiktningsdatabasen har statistik tagits fram för temperaturens och tryckets inverkan på sprickbildningen, ref [1]. Vid höga temperaturer upp till 300 °C är skadefrekvensen störst (samtliga fall med sprickbildning och frätgropar). Detta har även bekräftats på laboratorium då spänningskorrosion framförallt uppträder i vatten vid temperaturer över 150°C.

De höghållfasta stålen, s.k. 21++-stålen, spricker snabbare än de ordinära, som har en lång inkubationstid innan de spricker. Idag rekommenderas inte SS-stålen 21++ som

stål till matarvatten tankar. OX 520 som är ett företagsnamn på ett höghållfast stål, kan användas. Vanadin används inte i materialet, vilket gör det mindre sprickkänsligt vid svetsning.

Föreoreningshalten i stålet är viktig. Flera arbeten anger att svavelhalten har en stor inverkan på tryckkärlsståls spänningskorrosionsbenägenhet, ref [2, 3, 4]. Enligt flera forskare har mangansulfidinnestutningar stor betydelse för bildning av transkristallin spänningskorrosion såväl som SICC. I övrigt tycks inflytandet av materialparametrar vara av mindre betydelse än inverkan av miljö och belastningsparametrar. Mangansulfidinnestutningarnas fördelning, form och orientering tycks ha större inverkan på materialets känslighet för transkristallin spänningskorrosion och SICC än materialets kemiska sammansättning, undantaget svavelhalten. Tidigare undersökningar av spänningskorrosion i tryckkärlsstål, ref [5, 6] har visat att den kritiska potentialen för spänningskorrosion är beroende av svavelhalten i stålet. Figur 2.4-6 visar att den kritiska potentialen för spänningskorrosion beror av svavelhalten för stålen A533-B, A508, SS-stål 21 03 och OX 520 vid temperaturen 288 °C. Potentialen är uttryckt i millivolt (mV) och relaterat till normalvätgaselektroden (SHE). Potentialen kan mätas på stål i en vattenlösning med hjälp av en referenselektrod. Potentialen är den drivande kraften för korrosion. I detta fall är potentialen en direkt funktion av syrehalten i vattnet. En hög syrehalt i vattnet medför en hög potential, vilket leder till större risk för sprickbildning.



Figur 2.4-6. Den kritiska potentialen som funktion av svavelhalten i tryckkärlsstål vid temperaturen 288 °C, ref [4].

Figure 2.4-6. Critical potential as function of the sulphur content in pressure vessel steels at 288 °C, ref [4].

För stålen SS-stål 21 03 och OX 520 synes den kritiska potentialen för spänningskorrosion vara något högre än för stålen A508 och A533-B. Detta kan förklaras av att både struktur och hållfasthet är annorlunda för SS-stål 21 03 och OX 520



än för A508 och A533-B, ref [7, 8]. Strukturen i förstnämnda fall material utgörs av ferrit och perlit medan reaktortankstålen består av en seghärdningsstruktur.

Skadefall har visat att större risk för skador finns vid användning av SS-stål 21 03 än OX 520, framförallt beroende på att sistnämnda material har lägre föroreningshalter som svavel och fosfor, se Figur 2.4-6.

Sprickbildning kan även uppkomma vid tillverkningen. En författare, ref [9], har visat att svetsdefekter uppkomma vid tillverkningen är vanligt förekommande, cirka en tredjedel av samtliga tankar uppvisar svetsdefekter. Hur tankarna svetsas har stor betydelse för risken för sprickbildning. Svetsningen bör ske i en så kallad V-fog. Minsta svetsvolym bör läggas vid medieberörd sida, ref [10]. Rotsträngen skall läggas på insidan och därefter bör en "normaliseringssträng" placeras som sedan slipas bort. Planslipning rekommenderas på insidan för att slippa från smältdiken och andra defekter.

Det har visats att samtliga matarvattentankar som uppvisat sprickbildning ej är avspänningsglödade, ref [1]. Med hänsyn till kraven i SS 06 45 10, avsnitt 4.1.1 c) borde en sådan värmebehandling utföras.

Processparametrar såsom kraftiga temperaturväxlingar i matarvattnet och lastväxlingar kan påverka sprickbenägenheten. Cykliska laster som uppkommer i matarvattentankarna kan ha flera orsaker. Majoriteten har rapporterats som "vattenhammare", som är ett resultat av en blandning av varmt kondensat och kallt vatten. Vibrationer från matarvattenpumpar kan orsaka sprickbildning i svetsen mellan mavapumpens sugstuds och tankens mantel, se Figur 2.4-7, ref [11]. Det är uppenbart att miljöbetingad sprickbildning äger rum genom samtidig verkande korrosion s.k. anodisk upplösning (järn går i lösning enligt  $\text{Fe} = \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$ ) och cykliska spänningar, vilket kallas korrosionsutmattning.



Figur 2.4-7. Sprickbildning i svets mellan sugstuds och mantel.

Figure 2.4-7. A crack formed in the weld between nozzle and shell.

Skadefall har bekräftat att föroreningar i matarvattnet kan leda till sprickbildning i matarvattentankar. Föroreningar som klorider och sulfater, förutom syre, synes även ha en negativ inverkan på processen. Även laboratoriestudier har visat att föroreningar i högtemperaturvatten påverkar den kritiska potentialen för spänningskorrosion negativt genom närvaro av föroreningar. Den kritiska potentialen för spänningskorrosion sjunker vid tillsats av såväl natriumsulfat, svavelsyra, natriumklorid och saltsyra, ref [4].

Generellt gäller för stål som utsätts för vatten med låg syrehalt vid hög temperatur är att en tät skyddande oxidfilm av magnetit ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) bildas. Korrosionsmotståndet för stålet i matarvattentanken blir därmed beroende av magnetitfilmens egenskaper. Vid temperaturer under  $100^\circ\text{C}$  är den bildade oxidfilmen tunnare och frätgropar kan lättare initieras.

Besiktningsdatabasen, ref [1], har visat att flest antal spruckna matarvattentankar är tillverkade mellan 1970 – 80. Under senare tillverkningsår sjunker skadefrekvensen.

#### 2.4.1.2 *Provning av matarvattentankar*

Den säkraste metoden att upptäcka sprickor på komponenten är magnetpulverprovning av svetsskarvar, framförallt i korspunkterna.

#### 2.4.1.3 *Återstående livslängd hos matarvattentankar*

Sprickbildning i längsgående svetsar bör uppmärksammas speciellt då dessa kan leda till totalhaveri. Ref [13] föreslår att matarvattentanken som tas i drift skall inspekteras ett eller två år efter idrifttagandet. Om sprickor hittas i matarvattentanken skall denna inspekteras på nytt inom ett år.

#### *Drift och underhåll*

Det är av stor vikt hur matarvattentankarna körs. Genom att sänka drifttemperaturen och drifttrycket kan risken för sprickbildning minska.

#### *Skadetålighetsanalys*

För att få en uppfattning om hur allvarliga sprickorna är som hittas, kan en skadetålighetsanalys utföras. Beräkningen utförs i regel med hjälp av finita element metoden. Resultatet av beräkningen ger ett acceptabelt sprickdjup. Med kritisk sprickstorlek menas den kombination av djup och längd hos sprickan som medför att brott inträffar. Acceptabla sprickstorlekar erhålls genom att lägga till lämpliga säkerhetsfaktorer i beräkningen.

För SICC och korrosionsutmattning finns tillväxtlagar och om det är möjligt att bestämma föreliggande last- och temperaturvariationer är det också möjligt att beräkna antal cykler tills oacceptabla sprickdjup uppnås.

#### *Bortslipning av sprickor*

När sprickor hittas brukar dessa slipas bort. Acceptabelt sprickdjup och eventuellt kan även antal cykler/återstående livslängd med den nya geometrin beräknas enligt ovan. Om sprickdjupet är större än tillåtet kan svetsreparation övervägas. Svetsreparation i mantelsvets är inte komplicerat men avspänningsglödning är nödvändigt för att nya sprickor inte ska uppstå på kort tid. Svetsreparation vid stutsar kan bli mer komplicerade, särskilt om tanken är tillverkat av sprickkänsligt material.



### Vattenkemi

Det lösta syret i matarvattnet är den främsta miljöfaktorn som påverkar sprickbildningen och gropfrätningen. Vid temperaturer över 150°C finns stor risk för sprickbildning och vid lägre temperaturer fås gropfrätning. Lösta syrehalter av maximalt 8 ppb i vattnet efter avgasningen rekommenderas, ref [12]. Föroreningshalten i vattnet skall vara låg. Avgasning på kemisk väg kan användas som ett komplement då den termiska avgasningen inte är fullgod. Att avgasa matarvattnet bara med kemikalier bör undvikas. pH-värdet i vattnet skall vara mellan 8,5 till 9,6. De traditionella kemikalierna från restavgasningen är hydrazin eller natriumsulfit. Dessutom finns ett flertal organiska syrereduktionsmedel. För att använda hydrazin krävs tillstånd av Yrkesinspektionen, eftersom hydrazin klassades som ett gift 1977.

### Svetsreparationer

Det är av utomordentligt stor vikt hur svetsreparationerna utförs. Oftast skall man använda tunna elektroder, så att risken för svetsegenspänningar reduceras. När bortslipning av sprickorna utförs skall ett större område planslipas. Annars föreligger stor risk för att en liten anodyta, som utgörs av det bortslipade området, står i kontakt med en stor katodyta, d.v.s. området som har en kvarstående oxidfilm av magnetit. Generellt kan sägas att svetsning i samband med reparationer är svårare att utföra och fordrar större erfarenhet än svetsning vid nytillverkning. Särskilda svetsprocedurspecifikationer ska upprättas för varje reparation.

### REFERENSER

- [1] Sund, G., Andersson, M., Sprickbildning hos kolmangan- och mikrolegerade stål i pann- och matarvattenmiljö, Värmeforsk M6-618, Juli 1998.
- [2] Pednekar, S., Mizuno, T., Szklarska-Smialowska, S and MacDonald, D, D, Paper 244, Corrosion '82, Houston, March 1982, NACE.
- [3] Ford, F.P., Corrosion Processes, R.N., Parkins (Ed.) Applied Science Publishers, 1982.
- [4] Sund, G., Spänningskorrosion i tryckkärlsstål i vattenmiljö, Studsvik Arbetsrapport, M-91/48, 1991-11-05.
- [5] Hurts, P., Slow strain rate test round robin, ICCGR Meeting, Stockholm 21-22 May, 1990.
- [6] Kuniya, J et al., Stress corrosion cracking of low alloy steels used for reactor pressure vessel in high temperature oxygenated water. J Pressure Vessel Tech 107, 1985, pp 431-435.
- [7] Sund, G., Spänningskorrosion i tryckkärlsstål, Studsvik AB, 1989 (Studsvik/Ex-89/33).
- [8] Sund, G., Spänningskorrosion i tryckkärlsstål, Studsvik AB, 1990 (Studsvik/Ex-90/36).
- [9] Wedgbury, M.K., Environmentally assisted crack growth in deaerator storage vessel steels. Submitted in partial fulfilment of the requirements for the degree of PhD, sept. 1990.

- [10] Nordén, R., Svetsning av tryckkärl, Allmänna instruktioner, SSAB Oxelösund, 1988-07-12.
- [11] Larsson, U., Runeberg L.-J., Sprickbildning i äldre matarvattentankar. Kraftvärme 2002. Konferens anordnad av DNV nov 2002.
- [12] The National Board of Boiler and Pressure Vessel Inspectors, Vol. 41, October 1983, Ohio, USA.
- [13] Beckwith, R.J. et al. System design, specifications, operation, and inspection of deaerators. Tappi Journal, July 1987, p 45 – 47.

## 2.4.2 Avgasare

### *Funktion*

Innan spädvattnet kan tillföras pannan måste syrehalten i vattnet minskas. Spädvattnet innehåller löst syrgas som ger upphov till korrosion på de stålmaterial som normalt används i systemen. Vid förhöjda temperaturer kan mycket små halter av syre orsaka korrosionsskador i form av frätgropar. Den lösta syrehalten måste därför avlägsnas, avgasas, till en mycket låg nivå på syrekoncentrationen. Vattnet innehåller också andra gaser, t ex kolsyra och kväve, som i varierande grad kan avgasas.

Mekanisk avgasning bygger på två naturlagar:

1. Charles lag som beskriver att gasens löslighet i vätskan minskar med ökad temperatur i vätskan.
2. Henrys lag som beskriver att koncentrationen av någon löst gas i vätskan är proportionell mot gasens partialtryck.

Halten av löst gas i vätskan är alltså beroende av temperaturen samt halten av denna gas i gasfasen ovanför vätskeytan. Dessa två omständigheter används iden mekaniska avgasningen genom att vattnets temperatur höjs till kokpunkten och att gasen drivs av med en annan gas, vilket vanligen är vattenånga. Vid avgasningen bringas vattenångan, som är syrgasfri eller har mycket låg syrgashalt, i kontakt med det syrehaltiga vattnet. Syret kommer då att övergå i ångfasen och kan därmed avlägsnas.

Avgasningsfunktionen och uppvärmningen kombineras oftast i ett steg i matarvattenberedningen. Utrustningen består då av en matarvattentank, oftast trycksatt, med inbyggd avgasningsutrustning eller en avgasare monterad ovanpå tanken. För att effektivisera avgasningen finfördelas spädvattnet före avgasningen i det gasfyllda utrymmet, antingen genom en dysa eller med hålförsedda plåtar. De frigjorda gaserna tas ut i toppen via en stuts.

### *Konstruktion*

Det finns olika typer av avgasare såsom kaskadavgasare, dysavgasare och expansionsavgasare. Den vanligaste typen av avgasare är kaskadavgasare.

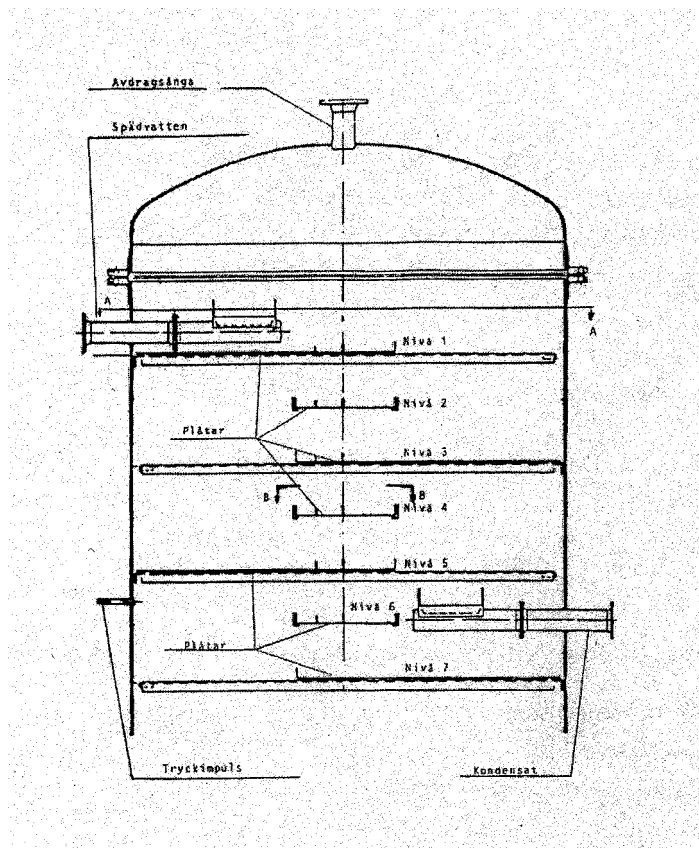
### *Kaskadavgasare*

Den hittills mest använda principen för avgasning i Sverige är kaskadavgasning. Kaskadavgasaren kombineras oftast med matarvattentanken och placeras ovanpå denna. Variationer i utrustningens konstruktion förekommer, men driftprincipen är densamma. Avgasning med kaskadavgasare sker i de flesta fall vid övertryck.

Normalt tillförs ånga till matarvattentanken via ett s.k. tystkokarrör vilket är försett med ett antal hål jämnt fördelade i längdriktningen. Röret är monterat strax ovanför botten i tankens längdriktning. Tystkokarröret lutar något i förhållande till horisontalplanet och har inloppssidan högst. Därigenom undviks alltför stora vibrationer, på grund av ångimplosioner, vid uppstart med kallt vatten i tanken.

Avgasaren innehåller rostfria/syrafasta plåtar som kallas kaskadplåtar. Dessa är monterade horisontellt, se Figur 2.4-8. Kaskadplåtarna är försedda med sidokanter och över en del av ytan finns ett stort antal hål. Dimensioneringen av kaskadplåtar skall vara sådan att inkommande spädvatten endast passerar genom kaskadplåtarnas hål.

Efter att vattnet har passerat avgasaren och når tanken är syrehalten i vattnet ej tillräckligt lågt. Det är därför viktigt att matarvattnets uppehållstid i tanken är tillräckligt lång så att slutavgasningen blir effektiv. Vid ett lämpligt ångbehov för värming av vattnet i avgasaren erhålls en genomströmning av ånga i matarvattenvolymen i tanken, varvid restavgasningen slutförs. Med en fullgod avgasning av matarvattnet ska restsyrehalten vara lägre än 10 ppb  $O_2$ .



Figur 2.4-8. Schematisk bild över en kaskadavgasare med plåtar.

Figure 2.4-8. Schematic picture over a cascade deaerator with plates.

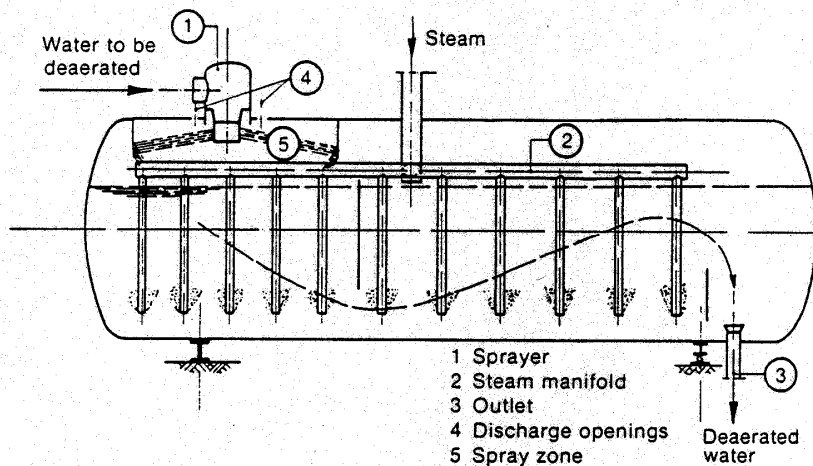
Ett litet ångflöde, avdragsånga, släpps ut till atmosfären från avgasarens topp tillsammans med de frigjorda gaserna från vattnet. Det är erfarenhetsmässigt mycket svårt att manuellt reglera lämpligt flöde och därför skall en strypbricka finnas inmonterad. Strypbrickan dimensioneras efter in- och utflöden från tanken och temperaturen i dessa medier, samt trycket i tanken. En del av energin i avdragsångan kan återvinnas. Ofta sker värmeväxling med spädvattnet. Då avdragsångflödet är kontinuerligt bör även flödet av det energiupptagande mediet vara kontinuerligt för att inte temperaturvariationerna skall ge för stora materialspänningar eller ångimpulser i värmeväxlaren.

Avgasarens placering på matarvattentanken har stor betydelse för strömningsbilden i tanken. Den kan inverka på avgasningen genom att uppehållstiden för vattnet i tanken blir för kort om inte hela vattenvolymen utnyttjas.

### Dysavgasare

I dysavgasaren finfördelas inkommande vatten i ångfasen, oftast med en dysa. Verkningsgraden för denna typ av avgasare beror på effekten av den varma ångan som träffar vattnet. En kraftig turbulens mellan ångan och vattnet krävs för att erhålla tillräcklig avgasning. Vattnet sönderdelas till små droppar, vilket ger en stor totalyta, som också krävs vid effektiv avgasning. Då dysan inte kräver stort utrymme i höjddled monteras den direkt i ångutrymmet i matarvattentanken. Om flödet till dysan varierar inom ett snävt intervall kan en enkel dysa utan regelringsmöjlighet användas. Då stora flödesvariationer förekommer används en dysa med variabel öppning, vilket kan åstadkommas med hjälp av en fjäder som påverkas av vattentrycket före dysan. Matarvattentanken är ofta indelad i en avgasningsdel och en förrådsdel genom att skärmplåtar finns inmonterade.

En vanlig typ av dysavgasare är Storkavgasaren, ref [1]. Spädvattnet tillsammans med kondensatet sprayas mot ångan, se Figur 2.4-9. Denna kommer in ovanifrån och leds genom ett horisontellt rör ned i matarvattentanken. På det långa horisontella röret finns även mindre vertikala rör monterade. Ånga genombubblar hela matarvatten-tanken.



Figur 2.4-9. Principen för Storkavgasare.

Figure 2.4-9. Principle of Stork deaeration system

### Expansionsavgasare

Om inkommande vatten till ett kärl har högre kokpunkt än vattnet i kärlet, kommer en del av inkommande vatten att förångas till dess att den lägre kokpunkten nås. Ångan som då bildas kallas expansionsånga, vilket medverkar till att finfördela vattendropparna och transportera bort de frigjorda gaserna. Expansionsavgasaren används oftast då ånga inte finns tillgänglig, t ex i system med hetvattenpannor. Värmningen av vattnet till avgasaren kan göras t ex med elpatroner eller värme-växling mot pannvatten och hetvatten.

### Material

Plåtar som förekommer i kaskadavgasare är framförallt tillverkade av rostfria stål, vanligen SS-stål 23 33, medan mantelplåt och gavlar vanligen utgörs av kolmangan-, mikrolegerade och låglegerade stål. I dysavgasare, typ Storkavgasaren, används

samma material som förekommer i matarvattentankar, dvs. kolmangan-, mikrolegerade och låglegerade stål.

#### 2.4.2.1 Skador på avgasare

##### *Galvanisk korrosion*

Galvanisk korrosion kan uppkomma om rostfria stål bultar används till "svarta" plåtar. Normalt är denna typ av galvanisk korrosion ej så besvärande, eftersom det ädlare materialet utgör en liten yta i förhållande till det oädlare materialet. Denna typ av galvanisk korrosion uppkommer i kaskadavgasare.

##### *Gropfrätning på ej rostfria stålkomponenter*

Ofullständig avgasning kan leda till gropfrätning orsakad av syrekorrosion. Vid avställning kan höga syrehalter i vattnet förekomma i systemet. Detta kan orsaka gropfrätning på stålkomponenter.

##### *Gropfrätning på rostfria komponenter*

Lokala korrosionsangrepp i form av frätgropar kan uppkomma på rostfria stål som har utsatts för matarvatten innehållande klorider.

##### *Vibrationer*

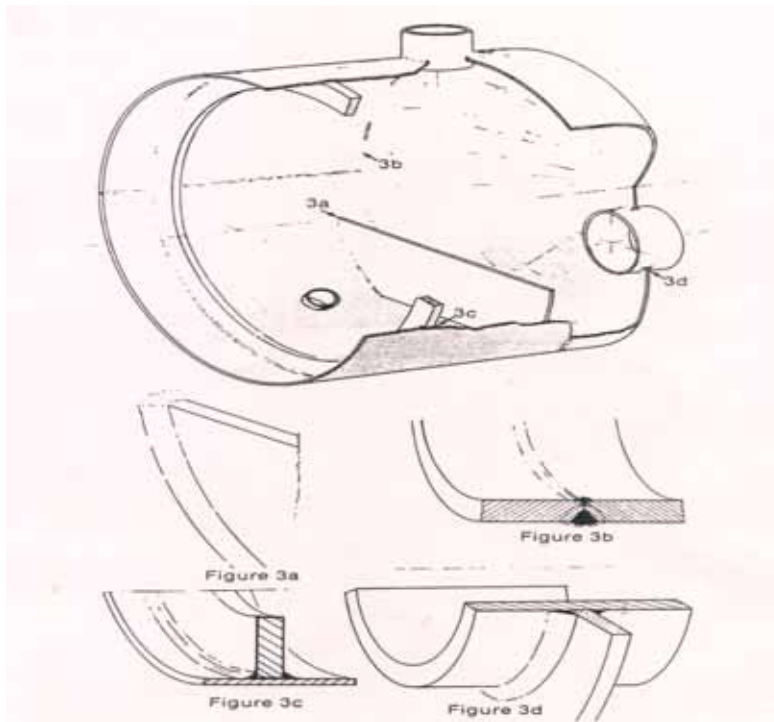
Vanligtvis orsakar vibrationerna i kaskadavgasaren att bultarna lossnar.

##### *Sprickbildning*

Skador i form av sprickbildning kan förekomma på komponenter tillverkade av ferritiska stål.

De sprickor som har uppkommit i dysavgasare (Storkavgasaren) har startat från insidan och i närheten av svetsar. Sprickorna propagerar tvärs svetsar, men sprickor finns även längs svetsar. Sprickorna är raka, ej förgrenade och transkristallina. Sprickspetsen är trubbig, uppvisar korrosion och fylld med oxider. Sprickmekanismen är korrosionsutmattning eller SICC. I många fall har sprickorna startat från frätgropar, ref [3].

Översikt av kritiska svetsar beträffande sprickbildning visas i Figur 2.4-10. Områden i avgasaren där sprickor har uppkommit är i svetsar vid bafflar (3a), rundgående svetsar (3b), svetsar vid förstärkningsringar (3c) och svetsar vid stutsar (3d), ref [1].



**Figur 2.4-10** Översikt av svetsskarvar med stor risk för sprickbildning i avgasare.

**Figure 2.4-10** Review of most critical welding details in deaerators.

Utgående från det inspektionsarbete på dysavgasare som utförts både i USA och i Europa samt ett stort antal undersökta skadefall på dysavgasare, framgår att dessa har tillverkats av ett stort antal olika materialkvaliteter och med olika tillverkningsförfarande. Majoriteten av sprickorna finns under vattenlinjen. Något samband har dock inte konstaterats mellan sprickbildning, ingående material, tillverknings sätt, livslängd, arbetstemperatur och -tryck samt vattenkemi. I vissa fall har nytillverkade avgasare erhållit omfattande sprickbildning medan äldre har klarat sig undan sprickor, ref [3], [4] och [5].

Ref [4] har visat genom studium av brottytor och sprickor i mikroskop på skadade komponenter, att sprickbildningen i avgasare är miljöbetingad och huvudsakligen beror på korrosion. Tillväxthastigheten för sprickor i avgasare kan ökas genom kraftiga temperaturväxlingar i matarvattnet och lastväxlingar.

#### 2.4.2.2 Provnings av avgasare

Efter att ha rengjort avgasaren äger en visuell inspektion rum, för att kartlägga sprickor, defekter, frätgropar etc. Framförallt inspekteras materialet och svetsar i tryckkärlet noggrant. Även invändiga delar, på de ställen, där svetsar är förankrade mot tryckkärlet besiktigas omsorgsfullt. Inredningen i tryckkärlet granskas med avseende på större defekter.

Den sprickundersökningsmetod som framförallt används är MT-provning på slipade ytor. Vid ultraljudprovning (UT-provning) kan endast de större sprickorna lokaliseras. Röntgen bedöms som tidsödande men kan indikera större sprickor, inhomogeniteter, övervalsning m.m.



Antalet frätgropar per kvadratdm kan uppskattas. Det maximala frätgropsdjupet uppmäts med en nålsticksmikrometer.

#### 2.4.2.3 Återstående livslängd hos avgasare

Den återstående livslängden hos komponenterna kan bedömas efter liknande principer som beskrivs om matarvattentankar (**avsnitt 2.4.1.3**).

Sprickbildning i längsgående svetsar bör uppmärksammas speciellt då dessa kan leda till totalhaveri.

Ref [6] föreslår att avgasaren som tas i drift skall inspekteras ett eller två år efter idrifttagandet. Om sprickor hittas i avgasaren skall denna inspekteras på nytt inom ett år. Enligt ref [7] skall avgasare funna med sprickor i tryckkärlet på nytt inspekteras inom ett år.

För rostfria komponenter är det viktigt att syrehalten i vattnet uppmäts under varje skift. Syrehalten skall inte överstiga 8 ppb O<sub>2</sub> och föroreningshalten i vattnet skall vara låg.

Avgasning på kemisk väg kan användas som ett komplement då den termiska avgasningen inte är fullgod. Att avgasa matarvattnet bara med kemikalier bör undvikas. pH-värdet i vattnet skall vara mellan 8,5 till 9,6. De traditionella kemikalierna från restavgasningen är hydrazin eller natriumsulfit. Dessutom finns ett flertal organiska syrereduktionsmedel. För att använda hydrazin krävs tillstånd av Yrkesinspektionen, eftersom hydrazin klassades som ett gift 1977.

#### REFERENSER

- [1] Bolten, J. G. Investigation into the cause of cracking in deaerators order to minimize the risk of collapsing, Netherlands 1986.
- [2] Bolten, J. G. and Jansse L. W. Cracking in deaerators results of inspection and measures for lifetime extension, Netherlands 1987.
- [3] Twigg, R. J. The reinspection of deaerators. Materials Performance, Vol 35, No 8, August 1996.
- [4] Chakrapani, D.G. Environmentally assisted cracking in welded deaerator vessels in the pulp and paper industry. Corrosions '86, NACE Conf. Houston, TX, Mars 1986, paper 138/1 – 138/11.
- [5] Vormelker, P.R. Deaerator inspection & analysis, Corrosion' 87, NACE Conf. San Fransisco, Mars 1987, paper 214/1 – 214/6.
- [6] Beckwith, R.J. et al. System design, specifications, operation, and inspection of deaerators. Tappi Journal, July 1987, p 45 – 47.
- [7] AFS 2002:1. Användning av trycksatta anordningar. Arbetsmiljöverket Stockholm 2002.

### 2.4.3 Matarvattenpumpar

#### *Funktion*

En pumps uppgift är att transportera ett flytande medium, oftast från en lägre till en högre nivå, eller att trycka in en vätska i en behållare med högre tryck än omgivningens. En pump skall med andra ord öka det strömmande mediets inneboende energi. Energiökningen sammansätts av de tre i hydromekaniken nämnda energiformerna (läges-, tryck- och rörelseenergi) och benämns vid pumpar uppforderingshöjd (H). Av betydelse för valet av pump i ett system är pumpens flödeskapacitet och hur mycket pumpen kan höja trycket, dvs. uppforderingshöjden.

Från matarvattentanken skall matarvattnet pumpas till den eller de pannor som är i drift. En matarvattenpump skall vara placerad på ett plan några meter lägre än matarvattentanken. För varje meter i höjdskillnad stiger matarvattnets tryck med 0.1 bar. En normal höjdskillnad är 5-10 meter vilket ger en tryckhöjning på vattnet vid matarvattenpumpens sug sida 0,5-1,0 bar. Detta ger en marginal för en viss trycksänkning i matarvattenpumpens inloppsdel till följd av att vatten sugas in i pumpen. Denna trycksänkning får dock inte vara större än den tryckhöjning som fås fram till pumpen. Med ett tryck i pumpen, som är lägre än trycket i matarvattentanken, kommer ånga att bildas av matarvattnet i pumpen. På trycksidan till pumpen är det inga problem, där är trycket högre än pannans tryck.

Vanligtvis talar man om begreppet NPSH (Net Positive Suction Head), vilket är skillnaden mellan totaltrycket på pumpens sug sida och vätskans ångbildningstryck. När det minsta trycket inuti pumpen är lika med ångbildningstrycket talar man om NPSH-värdet vid inträdande kavitation, vilket benämns erforderligt NPSH ( $NPSH_{\text{erf}}$ ). Eftersom  $NPSH_{\text{erf}}$  bestäms av pumpens konstruktiva utformning, lämnar pumptillverkaren uppgift om storleken av  $NPSH_{\text{erf}}$  vid olika volymflöden tillsammans med andra pumpdata.

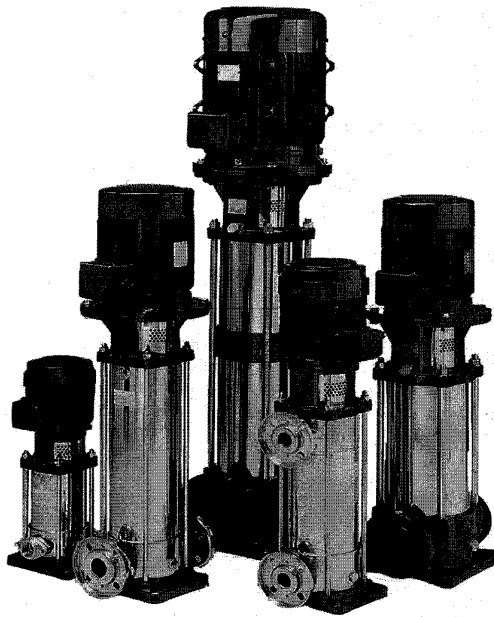
Benämningen anläggningens NPSH eller tillgängligt  $NPSH_{\text{tillg}}$  används och är NPSH-värdet bestämt av parametrar relaterade till anläggningen och oberoende av pumpens konstruktion. Villkoret för att i praktiska fall erhålla kavitationsfri drift i pumpen är att tillgängligt  $NPSH_{\text{tillg}}$  är större än erforderligt  $NPSH_{\text{erf}}$ .

Vanliga matarvattenpumpar är centrifugalpumpar, där den centrifugalkraft som alstras av ett snabbt roterande pumphjul utnyttjas för att öka trycket och hastigheten hos vätskan. Flödet som erhålls beror på tryckförhållandena.

#### *Konstruktion*

I en centrifugalpump åstadkoms den för väsketransporten erforderliga tryckdifferensen medelst ett pumphjul, som hastigt roterar i ett pumphus. Pumphjulen kan innefatta ett stort antal skovlar som är monterade på en axel i pumphuset. Ibland är dock pumphjulen homogena. Genom pumphjulet eller skovlarnas inverkan ökas vätskans tryck och rörelseenergi. Vanliga typer av centrifugalpumpar visas i Figur 2.4-11 och Figur 2.4-12.

De horisontella matarpumparna kan användas upp till 400 bar med en flödes hastighet av 1000 m<sup>3</sup>/h. Effekten på en sådan pump kan uppgå till 20 MW.



**Figur 2.4-11.** Vanlig typ av vertikala centrifugalpumpar, kopplad till en vanlig standardmotor högst upp, ref [1].

**Figure 2.4-11.** Ordinary types of vertical centrifugal pump directly coupled to an ordinary engine (above), ref [1].

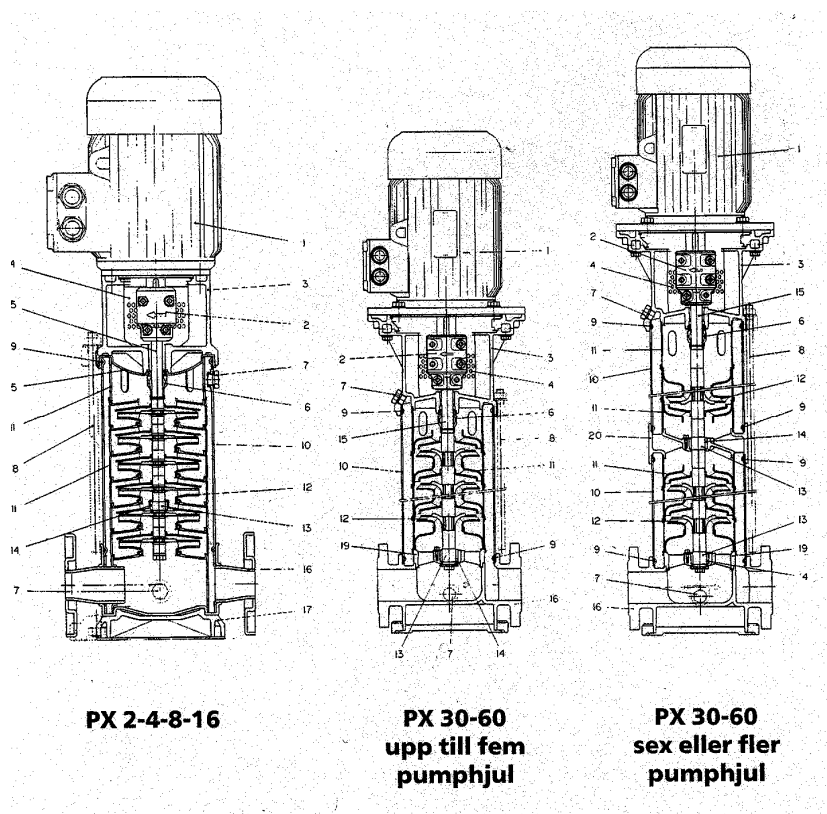


**Figur 2.4-12.** Vanlig typ av horisontella centrifugalpumpar, ref [2].

**Figure 2.4-12.** Ordinary type of horizontal centrifugal pump, ref [2].

### *Material*

Materialvalet mellan olika pumptillverkare kan skilja sig åt märkbart. En tillverkare av matarvattenpumpar väljer rostfritt stål i samtliga delar som kan komma i kontakt med den pumpade vätskan, ref [1]. Pumpen kan inte användas vid temperaturer över 120 °C. Materialvalet för de olika delarna av pumpen i Figur 2.3-13 framgår av Tabell 2.4-3.



Figur 2.4-13 Pumpens olika delar, ref [1].

Figure 2.4-13 The parts of the pump, ref [1].

Tabell 2.4-3 Materialval till pumpens olika delar i enlighet till Fig 2.4-13, ref [1].

| Ref.nr (Figur 2.4-13) | Beskrivning                                  | Material             |
|-----------------------|----------------------------------------------|----------------------|
| 1                     | Motor                                        | -                    |
| 2                     | Axelkoppling                                 | SS-stål 2343         |
| 3                     | Motorstativ                                  | Gjutjärn 250         |
| 4                     | Kopplingskydd                                | Aluminium            |
| 5                     | Tätningshållare                              | SS-stål 2353         |
| 6                     | Plantätning                                  | Hårdmetall/kol/EPDM/ |
| 7                     | Påfyllnings- och tätningspluggar samt O-ring | SS-stål 2343         |
| 8                     | Dragstänger                                  | SS-stål 2343         |
| 9                     | O-ringar (kit)                               | EPDM                 |
| 10                    | Mantel                                       | SS-stål 2353         |
| 11                    | Diffusorer                                   | SS-stål 2353         |
| 12                    | Pumphjul                                     | SS-stål 2353         |
| 13                    | Axelhylsa                                    | SS-stål 2343         |
| 14                    | Bussning                                     | Keramik              |
| 15                    | Axel                                         | SS-stål 2343         |
| 16                    | Pumphus                                      | SS-stål 2343         |
| 17                    | Fot                                          | Aluminium            |
| 19                    | Nedre stöd                                   | SS-stål 2343         |
| 20                    | Mellanstöd                                   | SS-stål 2343         |

Axeltätningen är det mest utsatta elementet i en pump och det lönar sig att ägna stor uppmärksamhet åt val, installation och underhåll av tätningen. Axeltätningar skall uppfylla standarder enligt DIN 24960 eller ISO 3069.

De två vanligaste metoderna för avtätning av en roterande axel i pumpen är genom plantätning och packbox. Packbox med formbart packningsmaterial är den traditionella tätningen för pumpar och ansätts med axiell kraft. I en plantätning sker avtätningen mellan en stillastående (stationärt) och ett roterande plan. Den stationära tätningsytan brukar utföras av ett hårt material såsom hårdmetall eller kiselkarbid och den roterande tätningsytan kan bestå av kol eller grafit. Det finns även stationära tätningar utförda i polymermaterial som EPDM.

Materialvalet i tätningar är beroende av matarvattnets temperatur. Tätningarna kan vara okyllda eller kylda, samt ha olika utföranden av spolvätska. Vanligtvis används vatten som kylningsmedel.

För en annan pumptillverkare är de vanligaste materialen i pumpen listade enligt Tabell 2.4-4. Dessa pumpar är vanligtvis större än pumparna i Tabell 2.4-3.

Pumptillverkaren har delat in materialvalet i fyra olika alternativ beroende på pH-värde och temperatur. Maximalt tryck i samtliga fall är 60 bar.

De vanligaste materialen i pumphuset för större pumpar är gjutjärn, medan stål och rostfritt stål kan väljas i vissa fall. I pumphjulet kan gjutjärn eller rostfritt stål gjutgods användas.

**Tabell 2.4-4 Vanliga material till olika komponenter i en pump enligt en pumptillverkare, ref [2].**

| Komponent       | Alternativ 1       | Alternativ 2       | Alternativ 3       | Alternativ 4       |
|-----------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Suggavel        | Gjutjärn 250       | Stålgjutgods       | Stålgjutgods       | RF gjutgods        |
| Tryckgavel      | Gjutjärn 250       | Stålgjutgods       | Stålgjutgods       | RF gjutgods        |
| Mellanhus       | Gjutjärn 250       | Stålgjutgods       | RF gjutgods        | SS-stål 2348       |
| Ledhjul         | Gjutjärn 250       | Gjutjärn 250       | RF gjutgods        | RF gjutgods        |
| Axel            | Seghärdat stål     | Seghärdat stål     | SS-stål 2303       | SS-stål 2377       |
| Pumphjul        | Gjutjärn 250       | Gjutjärn 250       | RF gjutgods        | RF gjutgods        |
| Sughjul         | Gjutjärn 250       | Gjutjärn 250       | RF gjutgods        | RF gjutgods        |
| Lagerhus        | Gjutjärn 250       | Gjutjärn 250       | RF gjutgods        | RF gjutgods        |
| Glidlager       | SiC/SiC            | SiC/SiC            | SiC/SiC            | SiC/SiC            |
| Axeltätningshus | SiC/SiC            | Stålgjutgods       | Stålgjutgods       | RF gjutgods        |
| Spaltring       | SS-stål 2350       | SS-stål 2350       | SS-stål 2350       | SS-stål 2350       |
| Axelhylsa       | SS-stål 2321       | SS-stål 2321       | SS-stål 2350       | SS-stål 2350       |
| Axelskyddshylsa | Seghärdat kromstål | Seghärdat kromstål | Seghärdat kromstål | Seghärdat kromstål |
| Avlastningskolv | Gjutjärn 250       | Gjutjärn 250       | SS-stål 2303       | SS-stål 2332       |
| Hylsa           | Gjutjärn 250       | Gjutjärn 250       | SS-stål 2303       | SS-stål 2332       |
| Dragbultar      | Seghärdat stål     | RF Stångstål       | RF Stångstål       | RF Stångstål       |

**Alternativ 1 och 2.** Temperatur  $\leq 140$  °C, pH: 9,0 – 9,3, restsyre O<sub>2</sub>: 0,02 mg/kg.

**Alternativ 3.** Temperatur  $\leq 200$  °C, pH: 9,0 – 9,3, restsyre O<sub>2</sub>: 0,02 mg/kg.

**Alternativ 4.** Temperatur  $\leq 200$  °C, pH: 6,5 – 9,3, restsyre O<sub>2</sub>: 0,02 mg/kg.

Den kemiska sammansättningen och hållfasthetsdata för de olika legeringarna framgår av Tabell 2.4-5 och Tabell 2.4-6 nedan.

Tabell 2.4-5 Kemisk sammansättning i vikts-% för olika material.

| Material           | C         | Si        | Mn        | Cr        | Ni        | Mo        | Al   |
|--------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------|
| Gjutjärn 250       |           |           |           | -         | -         | -         | -    |
| Stålgjutgods       | 0.18-0.23 | 0.30-0.50 | 0.50-0.80 | ≤ 0.30    | -         | -         | -    |
| Seghärdat stål     | 0.42-0.50 | 0.25      | 0.65      | -         | -         | -         | -    |
| Seghärdat kromstål | 0.33-0.43 | ≤ 1.0     | ≤ 1.0     | 16.5      | ≤ 1.0     | 1.15      | -    |
| RF gjutgods        | ≤ 0.07    | 2.0       | 1.5       | 17-20     | 10-12     | 2.0-2.5   | -    |
| RF Stångstål       | 0.37-0.44 | 0.15-0.35 | 0.70-0.90 | 0.70-0.95 | 1.65-2.0  | 0.30-0.40 | -    |
| SS-stål 2303       | 0.16-0.25 | ≤ 1.0     | ≤ 1.0     | 12.0-14.0 | ≤ 1.0     | -         | -    |
| SS-stål 2321       | 0.14-0.23 | ≤ 1.0     | ≤ 1.0     | 15.5-17.5 | 1.5-2.5   | -         | -    |
| SS-stål 2332       | ≤ 0.07    | ≤ 1.0     | ≤ 2.0     | 17.0-19.0 | 8.0-11.0  | -         | -    |
| SS-stål 2343       | ≤ 0.05    | ≤ 1.0     | ≤ 2.0     | 16.5-18.5 | 10.5-14   | 2.5-3.0   | -    |
| SS-stål 2348       | ≤ 0.03    | ≤ 1.0     | ≤ 2.0     | 16.5-18.5 | 11.0-14.0 | 2.0-2.5   | -    |
| SS-stål 2350       | ≤ 0.08    | ≤ 1.0     | ≤ 2.0     | 16.5-18.5 | 10.5-14.0 | 2.0-2.5   | -    |
| SS-stål 2353       | ≤ 0.03    | ≤ 1.0     | ≤ 2.0     | 16.5-18.5 | 11.5-14.5 | 2.5-3.5   | -    |
| SS-stål 2377       | ≤ 0.03    | ≤ 1.0     | ≤ 2.0     | 21.0-23.0 | 4.5-6.5   | 2.5-3.5   | -    |
| Aluminium          | -         | -         | -         | -         | -         | -         | 99.7 |



Tabell 2.4-6 Hållfasthetsdata för de olika materialen.

| Material           | Leveranstillstånd | Sträckgräns, MPa | Brottgräns, MPa | Förlängning, $\delta_s$ % |
|--------------------|-------------------|------------------|-----------------|---------------------------|
| Gjutjärn           | Gjutgods          | 165-228          | 250-350         | 1                         |
| Stålgjutgods       | Gjutgods          | 250              | 450-600         | 22                        |
| Seghärdat stål     | Seghärdat         | 300-660          | 600-800         | 9                         |
| Seghärdat kromstål | Seghärdat         | 600              | 800-950         | 14                        |
| RF gjutgods        | Gjutgods          | 190              | 450-650         | 20                        |
| RF Stångstål       | Seghärdat         | 700              | 900-1200        | 10                        |
| SS-stål 2303       | Seghärdat         | 450              | 750-950         | 11                        |
| SS-stål 2321       | Seghärdat         | 640              | 880-1080        | 12                        |
| SS-stål 2332       | Släckglödgat      | 210              | 600-800         | 15                        |
| SS-stål 2343       | Släckglödgat      | 220              | 510-710         | 15                        |
| SS-stål 2348       | Släckglödgat      | 210              | 490-690         | 25                        |
| SS-stål 2350       | Släckglödgat      | 220              | 510-770         | 20                        |
| SS-stål 2353       | Släckglödgat      | 210              | 490-690         | 20                        |
| SS-stål 2377       | Släckglödgat      | 450              | 680-880         | 20                        |
| Aluminium          | Gjutgods          | 40-90            | 110-140         | 10                        |

#### 2.4.3.1 Skador på matarvattenpumpar

De största problemen för pumpar är:

1. Mekaniska tätningar
2. Handhavandefel
3. Vibrationer
4. Kavitation

Dessutom kan syre läcka in och orsaka korrosion.

##### *Friktionsvärme*

Med roterande pumpshjul i stillastående vatten bildas friktionsvärme som kan ge en oönskad temperaturstegring i vattnet. På trycksidan om pumpen behövs en viss avtappning av matarvattnet för att säkerställa att det inte leder till ångbildning i pumpen. Denna avtappning sker via en återföring av matarvatten till matarvattentanken. Återföringsledningen får inte bli blockerad på något sätt när pumpen eller pumparna arbetar mot stängd ventil vid pannan.

Matarvattenpumparna kan också installeras för diskontinuerlig drift. Det innebär att matarvatten enbart pumpas när påfyllning av pannan sker. Så snart reglerventilen stänger flödet skall även matarvattenpumpen stoppas. Detta driftsätt kan vara aktuellt i mindre anläggningar där matarvattenförbrukningen är liten eller sker i intervaller.

##### *Kavitation*

Om trycket på pumpens sug sida är lägre än ångtrycket för vattnet kommer ångblåsor att bildas. De följer med vätskan genom pumpen till en punkt med högre statiskt tryck

där ångan kondenserar och blåsorna kollapsar. Fenomenet kallas kavitation och orsaken är tryckvariationer. När en blåsa kollapsar susar vattnet in i blåsan med en mycket hög hastighet för att fylla utrymmet. Energin i en sådan stråle är så pass stor att väggmaterialet eroderas. Konsekvensen av kavitationen av ångblåsor nära en vägg är en mekanisk avverkning av väggmaterialet. Skadorna har ett karakteristiskt utseende, se Figur 2.4-14.



**Figur 2.4-14** Kavitationsskada på ett propellerblad.

**Figure 2.4-14** Cavitation damage of a propeller blade.

När trycket ökar så att det överstiger ångtrycket i ångblåsan imploderar den. En smal vattenstråle sugas in i blåsan med hög hastighet och fortsätter ut ur bubblan på andra sidan. Strålens hastighet kan vara upp till 100 m/s och när den kolliderar med en vägg innebär det ett hårt slag mot denna, vilket innebär att oxidskiktet förstörs och den underliggande metallen deformeras. Den blottade metallytan bildar ett nytt oxidskikt vilket innebär en indirekt korrosion på metallen.

Ångblåsor bildas lätt på ytor där ytråheter utgör kärnbildningsställen. Undertryck uppstår ofta nära eller på en yta i rörelse såsom ett pumphjul. Detta skapar gynnsamma förutsättningar för kavitationsangrepp i pumpar eller i partier med störd strömning, där strömningsriktningen hastigt ändras.

Kavitationsskador kan minskas genom att undertrycka bildandet av ångblåsor, t ex genom att öka det statiska trycket på pumpens sug sida eller genom att ändra utformningen av strömningskanalen. Pumphjul av gjutjärn bör bytas ut mot hjul av mer motståndskraftiga material som rostfritt stål.

#### *Gropfrätning och spaltkorrosion*

Mekanismen för gropfrätning och spaltkorrosion är mycket likartade och gropfrätning kan anses som ett specialfall av spaltkorrosion, vilket är korrosionsangrepp på en metall i tunna spalter mellan metallföremål eller mellan en metall och ett icke-metalliskt material. Karakteristiskt för angrepp av typ gropfrätning och spaltkorrosion är att största delen av ytan är fri från angrepp. I det angripna området aktiveras ytan.

Eftersom den omgivande stora ytan är passiv, accelereras angreppet galvaniskt. Angreppshastigheten över en längre tid är svår att förutsäga, eftersom också relativt små förändringar i miljön kan medföra initiering av korrosionsangrepp eller återbildning av skyddande oxidskikt.

Svårigheten att undvika eventuella konstruktiva spalter, medför att det normalt är spaltkorrosion snarare än gropfrätning, som är begränsande för livslängden i pumpen. Spaltkorrosion på rostfria stål kan uppkomma under bultskallar, O-ringar och packningar.

#### *Avlagringskorrosion*

Avlagringar kan komma in i pumpens inre delar och ge upphov till avlagringskorrosion. Denna typ av korrosion kan ses som en form av spaltkorrosion under avlagringar.

#### *Erosion*

Erosion innebär materialavverkning från en solid kropp på grund av mekanisk interaktion mellan kroppens yta och en vätska. Tre olika typer av erosion förekommer:

- Fastpartikelerosion
- Slamerosion
- Dropperosion

Erosion på grund av fasta partiklar orsakas genom att små fasta partiklar träffar ytan. Slam har en annan viskositet och densitet på det bärande mediet än fasta partiklar, annars är mekanismen slamerosion likvärdig med erosion på grund av fasta partiklar.

Slamerosion uppkommer när ytorna kolliderar med partiklarna i vätskeströmmen. Likheten med abrasiv nötning är slående eftersom partiklarna med hydrodynamisk kraft träffar ytan.

Dropperosion innebär att vattendroppar med hög hastighet kolliderar med en yta. Konsekvensen blir att ett material avverkas från ytan, vilket leder till försämrade materialegenskaper och försämrad funktion. När en droppe med hög hastighet träffar en yta ger den upphov till tryckspänningar. När ett tillräckligt stort antal droppar träffar samma yta och materialets sträckgräns överskrids, kommer det att deformationshårdna och materialet blir sprött. Fortsatta kollisioner leder till sprickbildning, partiklar bryts loss och en sträv och taggig yta erhålls. Kavitation har liknande effekter på ytor. Båda mekanismerna innebär en chockvåg som träffar ytorna. Av denna anledning så innebär det att material som klarar vätskedropperosion även klarar kavitation.

#### *Erosionskorrosion*

Erosionskorrosion kan beskrivas som ett accelererat angrepp på grund av en kombination av mekanisk nötning och ett kemiskt angrepp. Vanligast är erosionsskador på pumphjulet.

Skadefall, som kan hänföras till typen erosionskorrosion, har inträffat vid en del anläggningar där man i restavhårdande syfte doserat komplexbildare. Skyddsskiktet av magnetit kommer, om halten av komplexbildare är för hög, att bli väsentligt mindre resistent mot mekanisk påverkan. Följden blir att magnetitskiktet försvagas och lossnar från ytor som utsatt för höga hastigheter och störd strömning. Vidare tillväxt av ett tätt

sittande skyddsskikt förhindras genom att bildad  $\text{Fe}(\text{OH})_2$  transporteras bort i samma takt som den bildas.

Vid matarvattenpumpar, som arbetar med totalavsaltat spädvatten eller enbart kondensat, kan skador på grund av erosionskorrosion inträffa, ref [3]. Orsaken är att man aldrig hinner bilda ett skyddsskikt på ytorna. Eftersom skyddsskiktsbildningen gynnas av ett förhöjt pH-värde bör man vid saltfattiga vatten höja pH-värdet till  $> 9,0$  om möjligt 9,5. Ett annat sätt att undvika risken för erosionskorrosion i saltfattiga vatten, är att välja rostfritt stål som material i pumpen.

#### *Vibrationer*

Pumpen skall alltid arbeta lugnt och vibrationsfritt. Fortlöpande körning vid vissa resonansvarvtal ska undvikas. Vibrationer över acceptabla nivåer i pumpen och/eller omgivande rörsystem kan uppkomma om pumpen arbetar utanför sitt arbetsområde. Rent mekaniska orsaker exempelvis obalans, snedställning i axel, felaktig förankring, slitage mm, kan även ge upphov till vibrationer. Tillämpbara standarder och rekommendationer finns där acceptabla vibrationsnivåer registrerade under drift ges. Se referenserna [4] och [5] angående detta.

#### *2.4.3.2 Provnings av matarvattenpumpar*

Vanligtvis utförs leveransprovningen hos pumptillverkaren. Där ställs också pumpens verkningsgrad in. Efter fyra till fem år utförs en mindre revision på pumpen, då vissa slitrings- och tätningar kan bytas ut. Efter ytterligare fem år utförs på nytt en mindre revision. Den större revisionen genomförs efter femton år. Då plockas pumpen isär.

#### *2.4.3.3 Återstående livslängd hos matarvattenpumpar*

Skötsel av packboxar och plantätningar är ett viktigt moment i det förebyggande underhållet. Plantätningar har normalt en livslängd av 3 till 5 år vid måttliga tryck och utan något speciellt underhåll. Det måste emellertid ske regelbunden kontroll så att begynnande fel upptäcks, särskilt att spolvätska, om sådan används, obehindrat tillförs, ref [6].

Vibrationer och tryckvariationer i matarvattenssystemet kan orsaka haverier i pumpar. För att eliminera haverier bör tryckmätare kunna monteras in vid såväl tryck- som sugflänsen. Ett larm kan också installeras som då larmar vid alltför höga tryck. En termometer kan installeras på pumphuset, så att inte temperaturen blir för hög.

Livslängden för pumpar är framförallt beroende av pumphjulet. Pumphjulet är den komponent i pumpen som slits ut snabbast.

I matarvattenpumpar till fjärrvärmevatten används vanligen gjutjärn i pumphuset. I ett äldre system där korrosionsskyddet på ytorna utgörs av magnetit, skyddas även gjutjärnet mot fortsatt korrosion. Byts pumpen ut i systemet kommer gjutjärnet att korrodera på grund avsaknad av en skyddande oxidfilm, medan omgivande rörytor har erhållit en tät oxidfilm med god vidhäftning.

Ett annat problem som begränsar livslängden för pumpar är att tätningar slits ut på grund av nötning. I matarvattenssystemet skyddas rörsystemet invändigt av magnetit ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) mot korrosion. Magnetiten kan ibland lossna från rörväggarna och lägga sig på tätningstytorna. Magnetitkristallerna kan bilda små partiklar som nöter sönder tätningarna.

Avjoniserat vatten kan i vissa fall orsaka gropfrätning på kolytor. Alkalisk miljö och höga pH-värden i vatten kan innebära kemiska angrepp på kiselkarbid och keramiska material.

#### REFERENSER

- [1] Pumpar från Flygt, Produktkatalog april 2003.
- [2] Pumpar från KSB Mörck AB, Produktpresentation 1777.1/2-55 G3.
- [3] Bjurström, H, Carlsson, B. Handbok i vattenkemi för energianläggningar, Projekt M6-814, Värmeforsk mars 2001.
- [4] International Standard, ISO 10816-3  
Mechanical vibration – Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts – Part 3.
- [5] Hydraulic Institute  
Acceptable Filed Vibration Limits for Horizontal Pumps, 14<sup>th</sup> edition, Centrifugal Pumps Applications.
- [6] Pumphandboken  
3:e upplagan, Falköping 1982.

#### 2.4.4 Matarvattenledningar

##### Konstruktion

I matarvattenledningarna transporteras matarvatten från matarvattentank till ekonomisar. Detta sker med hjälp av matarvattenpumpen placerad nivåmässigt under matarvattentanken. Med ventiler inbyggda, och avgreningar till olika ekonomisar och eventuella recirkulationsledningar mellan ekonomisar blir det ett system av ledningar. Matarvattentanken och ekonomisarna är ofta placerade på ett relativt stort avstånd ifrån varandra och matarvattenledningarna kan uppgå till sammanlagda längder av hundratal meter.

Matarvattenledningssystemet är försett med reglerventil, fördelningsventiler, avstängningsventiler och backventiler. Backventiler kan ha flera uppgifter i systemet. I anläggningar med dubblade pumpar fungerar backventiler dels för att komplettera avstängningsventiler vid en-pumps drift, dels för att skydda pumpen mot bakåtrotation vid pumpstopp då pannan står under tryck. I övrigt kan backventiler vara placerade i olika positioner för att förhindra returströmning av vatten vid stora läckage som t.ex. rörbrott. Det kan också finnas strypflänsar och flänsförsedda ventiler placerade på matarvattenledningarna.

I vissa anläggningar finns en vattenluftervärmare. Matarvatten används då till luftvärmningen genom att matarvatten leds via en värmeväxlare i luftförmaren.

Det är högt tryck i matarvattenledningar, beräkningstrycket är i paritet med pannans konstruktionstryck. Vattentemperaturen i matarvattenledningarna kan vara olika i olika anläggningar och ibland även i olika delar av samma matarvattensystem. Vanligtvis förekommer vattentemperaturer upp till 260°C.

##### Material

Det vanligaste materialet i matarvattenledningar är rör av olegerade tryckkärlsstål. Låglegerade stål förekommer men de har inte någon större användning trots att de motstår erosionskorrosion mycket bättre än olegerade stål. Det räcker med att de innehåller någon viktprocent krom. Austenitiska rostfria stål förekommer i kärnkraftsverk (tyska) men knappast i kraftvärmeverk. **Tabell 2.4-7** ger exempel på material som används till matarvattenledningar.

**Tabell 2.4 -7. Material som används till matarvattenledningar.**

| Kategori        | Material     | Sträck- och brottgräns (MPa) | Sammansättning                              |
|-----------------|--------------|------------------------------|---------------------------------------------|
| C-Mn stål       | St 35.8/P235 | 235/360-480                  | 0-0,17C; 0,4-0,8% Mn                        |
| C-Mn stål       | St 45.8/P265 | 255/410-530                  | 0-0,21% C; 0,40-1,20% Mn                    |
| C-Mn stål       | A234 Gr WPB  | 240/415                      | 0-0,30% C; 0,29-1,06% Mn                    |
| Låglegerat stål | 15 Mo 3      | 270/450-600                  | 0,12-0,2% C; 0,25-0,35% Mo                  |
| Låglegerat stål | 10 CrMo 9 10 | 280/450-600                  | 0,08-0,15% C; 0,9-1,2% Mo;<br>2,0-2,5% Cr.  |
| Låglegerat stål | 13 CrMo 4 4  | 290/440-590                  | 0,08-0,15% C; 0,45-0,55% Mo;<br>0,7-1,1% Cr |

Vid svetsning av matarvattenledningar krävs förvärmning och avspänningsglödning för låglegerade stål men detta är inte nödvändigt för de olegerade stålen.

#### 2.4.4.1 Skador i matarvattenledningar

Den vanligaste typen av skada i matarvattenledningar är erosionskorrosion. Erosionskorrosionen påverkas av:

- materialets sammansättning
- temperatur
- lågt pH
- låg halt löst syre
- röргеometri
- flödes hastighet

Den här formen av erosionskorrosion kallas även flödesinducerad korrosion.

##### *Materialets sammansättning*

Legeringsämnen såsom molybden, koppar och framför allt krom ger en minskad erosionskorrosion. Redan små mängder krom har stor effekt. Praktiska försök har visat att ett 2,25Cr1Mo-stål har fyra gånger så långsam avverkningshastighet som kolstål. Med högre kromhalter minskar avverkningshastigheten ytterligare men inte alls lika kraftigt som upp till 2 % Cr.

##### *Temperatur*

Erosionskorrosionen av olegerade stål är kraftigast i temperaturer från 120 till 170°C. Över och under dessa temperaturer minskar erosionskorrosionen marakant. Det är således i det temperaturintervall som matarvattenledningarna arbetar i som också är de känsligaste temperaturerna för erosionskorrosion.

##### *pH-värde*

Störst erosionskorrosion får man vid pH 7-9 och under 5. Över pH 9,2 minskar erosionskorrosionen kraftigt. Normalvärde är 9-9,5.

##### *Löst syrehalt*

En högre halt löst syre ger en förbättrad repassivering och därmed en minskad erosionskorrosion. Höga halter av löst syre försöker man dock undvika eftersom det ger upphov till allvarlig korrosion i andra system och komponenter i anläggningen. Den skall därför begränsas till <10µg/lit. Om en låg halt hög syre har stor inverkan på erosionskorrosionen är dock omtvistat eftersom flera anläggningar med låg halt löst syre inte har haft problem med erosionskorrosion i matarvattenledningar.

##### *Röргеometri och flödes hastighet*

Flödet genom böjar, T-stycken, svetsar, öppningar och ventiler skapar turbulens i flödet som kan verka till att erosionkorrosion uppstår. Flödes hastigheten har en betydligt större inverkan på kolstål än på legerade stål.

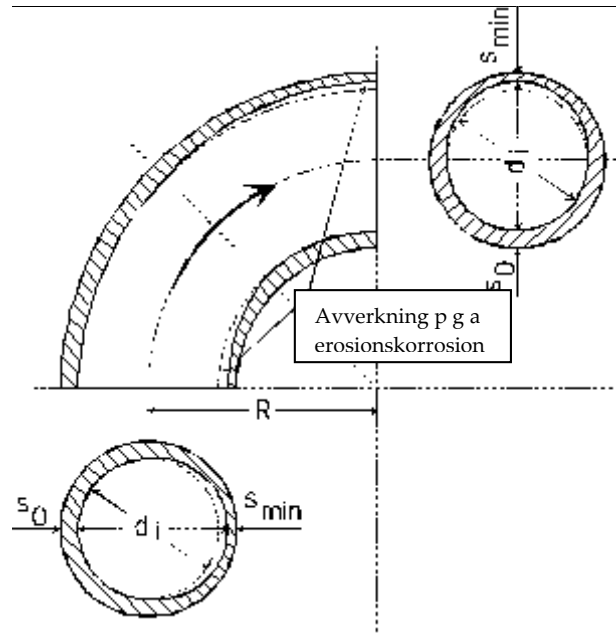
Skadorna består ofta av en mer eller mindre utbredd jämn materialavverkning av utsatta positioner.

Avverkningen kan också vara lokal eller med fläckvis utbredning. I kvarvarande områden utan godsförtunning finns då också den invändiga oxiden kvar. I sådana fall



kan det istället vara fråga om angrepp orsakade av kavitation. Kännetecken för kavitation är att ytan blir vågig och kan uppmärksammas genom ett karaktäristiskt, knattrande ljud.

Figur 2.4.4-15 visar hur avverkningen pga. erosionskorrosion typiskt sker i en rörböj. Flödes hastigheten i en rörböj har beräknats kunna vara 2-3 gånger så hög som i ett rakt rör, vilket alltså kan räcka för att erosionskorrosion ska uppstå.

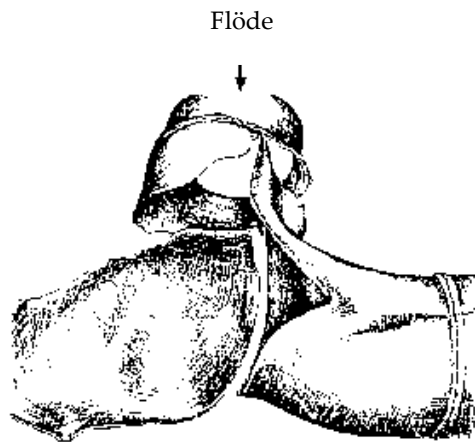


Figur 2.4.4-15 Positioner i en rörböj som avverkas vid erosionskorrosion [1].

Figure 2.4.4-15 Erosion corrosion positions of a pipe bend [1].

I USA har minst tre haverier av matarvattenledningar orsakade av erosionskorrosion uppstått under den senare delen av 1990-talet vilka åstadkommit stor materiell skada och även personskador [2]. Haverierna har förekommit både i kraftvärmeverk och i kärnkraftverk. I dessa fall har man inte kunna koppla haverierna till någon speciell design eller drifthistoria men materialen hade mycket låg kromhalt.

Erosionskorrosionen resulterar ofta i en jämn avverkning över en större yta. Brottet i t.ex. en rörböj kan då bli dramatiskt. Figur 2.4.4-16 visar hur en, på grund av erosionskorrosion, havererad rörböj i en matarvattenledning kan se ut.



**Figur 2.4.4-16** Havererad rörböj på grund av erosionskorrosion [3].

**Figure 2.4.4-16** Failure of pipe bend as a result of erosion corrosion [3].

Utöver rörböjar är det vanligt med erosionskorrosion vid ventiler, flänsar och t-stycken. Även i rörledningar intill dessa komponenter är det vanligt med godsförtunning. Skadorna är vanligen värst närmast intill det område där turbulens uppstått i vattenflödet och avtar med avståndet från denna. Betydande skador kan hittas på upp till ett par meters avstånd från t.ex. backventiler och strypflänsar.

Rena korrosionsangrepp kan också uppstå i matarvattenledningar [4]. Med hög syrehalt i matarvattnet finns det risk för punktkorrosion och i fall av lågt pH kan en jämn korrosion åstadkommas av vätejoner. Korrosionen beror ofta på att man har förorenat återgående kondensat. Kondensatet kan renas i mekaniska filter och i större anläggningar genom en separat anläggningsdel för kondensatrening t.ex. med hjälp av pulverjonbrytare.

En ovanligare skada som det finns exempel på är spänningskorrosionssprickor. Sådan skada kan inträffa i matarvattenledningarnas svetsar om det är fråga om material som inte har avspänningsglödats (olegerade stål).

En annan typ av skada som finns rapporterad är att packningen i flänsar vittrar bort så att läckage uppstår [4].

#### 2.4.4.2 Provnings av matarvattenledningar

För att kunna hitta godsförtunning på grund av erosionskorrosion är det nödvändigt att mäta godstjockleken på utsatta positioner. Det utförs vanligen med handapparater avsedda för tjockleksmätning. Tjockleken mäts då punktvis med ultraljud och det krävs ett rutnät med många mätpunkter för att kunna kartlägga skadan. Vid ventiler, t-stycken, flänsar så mäts även minst 1,5 meter av den raka rörledningen intill. Finns svetsar på ledningen i närheten av ventiler, t-stycken och flänsar bör mätning ske även längs 1 meters avstånd på vardera sidan om dessa.

En alternativ metod är att utföra digitalröntgen och utläsa eventuell godsförtunning genom bildanalys. Detta kan göras utan att avisolera ledningarna och även utan att tömma dem på vatten, det vill säga provningen kan utföras då anläggningen är i drift.

Har syrehalten varit hög eller okänd kan det vara skäl till att leta efter punktkorrosion. Det är liten chans att upptäcka punktkorrosion vid ordinär tjockleksmätning eller

profilröntgen. Undersökning med endoskop kan avslöja punktkorrosion. En sådan undersökning kräver tömning av systemet och att man får öppna röret på lämpliga ställen för att komma åt med endoskopet.

Det finns (2015) inga föreskrifter på andra undersökningar än visuell inspektion av rörledningarna och dess upphängningsanordningar samt att dess säkerhetsanordningar kontrolleras vart tredje år. Det är vanligt att provning av invändiga skador rekommenderas vid besiktningar och även utförs i anslutning till sådana. Det ligger dock på anläggningsägarens ansvar att det verkligen genomförs en relevant provning i syfte att undvika haverier.

Syrekorrosion och korrosion orsakat av lågt pH ska kontrolleras genom regelbunden analysövervakning. Vid större anläggningar sker det oftast med kontinuerliga analysinstrument.

#### 2.4.4.3 Återstående livslängd hos matarvattenledningar

Matarvattenledningar är i princip dimensionerade för en obegränsad livslängd men i verkligheten är livslängden vanligen begränsad, åtminstone för delar av ledningssystemen. Med rätt matarvattenkvalitet kan man undvika korrosion. Erosionskorrosionen kan vara svår att eliminera men man kan avsevärt minska avverkningen, t.ex. genom att modifiera geometrin eller att sätta in kromhaltigt stål. Det är ganska typiskt att godsförtunning på grund av erosionskorrosion ~~börjar~~ kan bli kritisk vid utsatta positioner efter ca 100 000 drifttimmar. Det kan i vanliga fall rekommenderas att utföra provning efter ungefär denna drifttid.

I fall där man kan identifiera komponenter som geometriskt är särskilt känsliga för erosionskorrosion eller om matarvattenkvaliteten inte varit tillfredsställande kan det vara lämpligt med undersökningar och provning kanske redan vid 50 000 -70 000 drifttimmar.

Hittar man betydande godsförtunningar på utsatta komponenter vid provningen får man byta ut dessa eller möjligtvis göra en svetsreparation om skadan är mycket lokal. Har avverkningshastigheten varit stor är det, som tidigare nämnts, lämpligt modifiera konstruktionen så att skadorna blir mindre. Det kan också vara lämpligt att sätta in ett 2,25 % Cr-stål om det tidigare varit ett stål utan eller mindre än 1 % krom. Som tidigare nämnts så innebär ett byte från olegerat till låglegerat material att man måste förvärma och avspänningsglöda vid svetsningen. En fördel med detta är att man då kan undvika spänningssprickning.

Efter en uppmätning av godstjockleken kan man bedöma den fortsatta avverkningen. Det enklaste sättet är att göra en linjär extrapolation av den hittillsvarande avverkningshastigheten.

I bästa fall finns det provning utförd sedan tidigare att jämföra med. Då kan man se om avverkningen varit linjär med tiden hittills genom att jämföra värden från utgångstillståndet och ifrån de två eller fler provningstillfällena.

Är det första gången provningen sker har man bara utgångstjockleken att jämföra med. Uppgifter på detta finns i specifikationerna på röret i fråga men den verkliga ursprungliga godstjockleken kan ligga inom de specificerade toleranserna. Mätning på referenspunkter som bör vara utan eller med ringa erosionskorrosion är till hjälp för att mer exakt avgöra den ursprungliga godstjockleken.

Det är inte säkert att den fortsatta avverkningen är linjär men räknar man med detta till dess att den minsta tillåtna godstjockleken uppnåtts så har man ändå en betryggande angivelse på tiden till att skadan bör åtgärdas. Denna metod förutsätter att man redan haft en uppmätt avverkning på åtminstone ca 20 % av den ursprungliga godstjockleken att ha som utgångspunkt i extrapolationen. Det beror på att avverkingshastigheten ofta är liten i början för att sedan öka och sen stabiliseras på en högre nivå. Den minsta tillåtna godstjockleken kan variera en del men brukar ligga omkring 50 % utav den ursprungliga.

Det är också möjligt att beräkna den återstående livslängden genom att använda lagar för hastigheten på erosionskorrosionen som kan antas gälla för det aktuella materialet. Man måste också ha nödvändiga processparametrar såsom t ex flödeshastighet, tryck, temperatur vattenkemi samt material och ritningar på komponenterna i matarvattensystemet. T.ex. har EPRI tagit fram ett program som ganska detaljerat kan beräkna de fortsatta avverkningshastigheterna i ett rörsystem med faktorer som ovan som indata [5]. Programmet har uppgraderats på senare tid och finns tillgängligt men kostnaden är hög. Det finns även rekommendationer framtagna av EPRI för inspektion av matarvattenledningar och kontroll på vattenkemin i syfte undvika haverier pga. erosionskorrosion [6].

#### REFERENSER

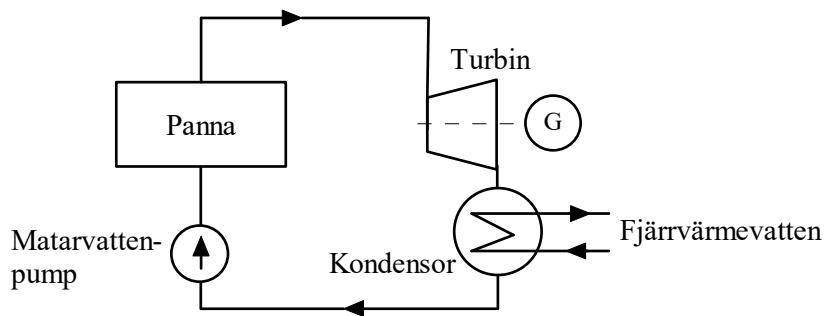
- [1]. [www.kae-gmbh.de/ebeisp.htm](http://www.kae-gmbh.de/ebeisp.htm)
- [2]. Potential for Feed Water Pipes in Electrical Power Generation Facilities to Rupture Causing Hazardous Release of Steam and Hot Water. Occupational Safety & Health Administration, Hazard Information Bulletin, October 31 1996.  
[www.osha.gov/dts/hib](http://www.osha.gov/dts/hib).
- [3]. US Regulatory Commission [www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/gen-comm/info-notices/1986/in86106s1.html](http://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/gen-comm/info-notices/1986/in86106s1.html)
- [4]. Ivan Falk  
Undersökning av skador på en matarvattenledning. Studsvik Material AB 1997.
- [5]. Checkworks™ Flow-Accelerated Corrosion: User Guide, EPRI TR-103198-P1, 1997.
- [6]. Recommendations for an Effective Flow-Accelerated Corrosion Program EPRI TR-108859, 1997.

## 2.5 KONDENSORER

### 2.5.1 Kondensorer

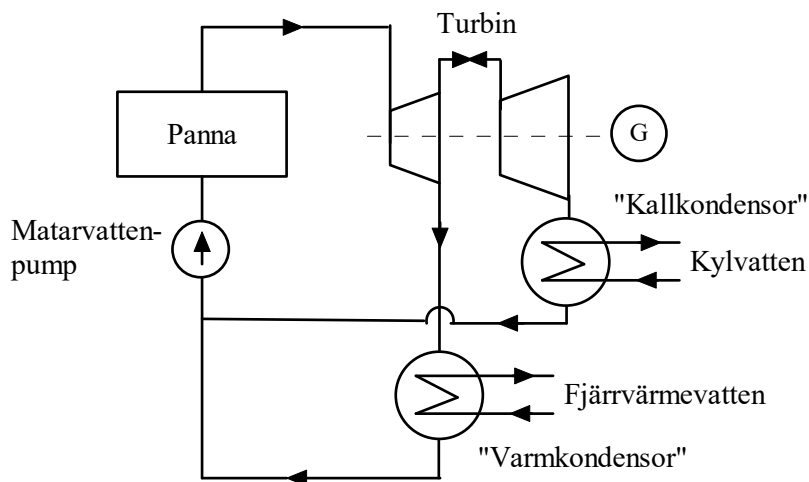
En kondensors funktion är att kondensera vattenånga till vatten. Under denna process sker en kraftig volymminskning av mediet samtidigt som värmeenergi avges. I ångkraftprocessen (panna - tillfört värme, turbin - avgivet arbete, kondensor - avgivet värme, matarvattenpump - tillfört arbete) är kondensorn en väsentlig komponent som möjliggör själva processen. Genom att kondensorn kondenserar ångan som kommer från turbinen till vatten kan matarvattenpumpen komprimera vattnet innan det förs vidare till pannan.

Förekommande typer av kondensorer kan delas in i två huvudgrupper, varmkondensorer och kallkondensorer. Gemensamt för varmkondensorer är att det värme som avges vid kondenseringen tas till vara på genom uppvärmning av exempelvis fjärrvärmevatten. Vad gäller kallkondensorer kyls kondensationvärmes bort utan att användas. Exempel på olika anläggningskoncept visas i Figurerna 2.5.1-1 - 2.5.1-3.



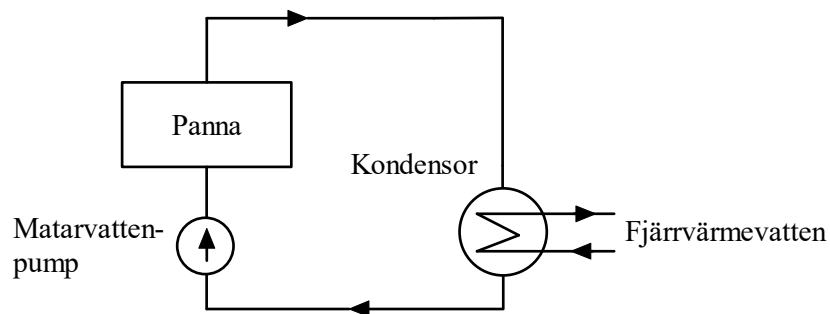
Figur 2.5.1-1 Ren mottrycksanläggning.

Figure 2.5.1-1 Back pressure plant.



Figur 2.5.1-2 Avtappningskondensringsanläggning.

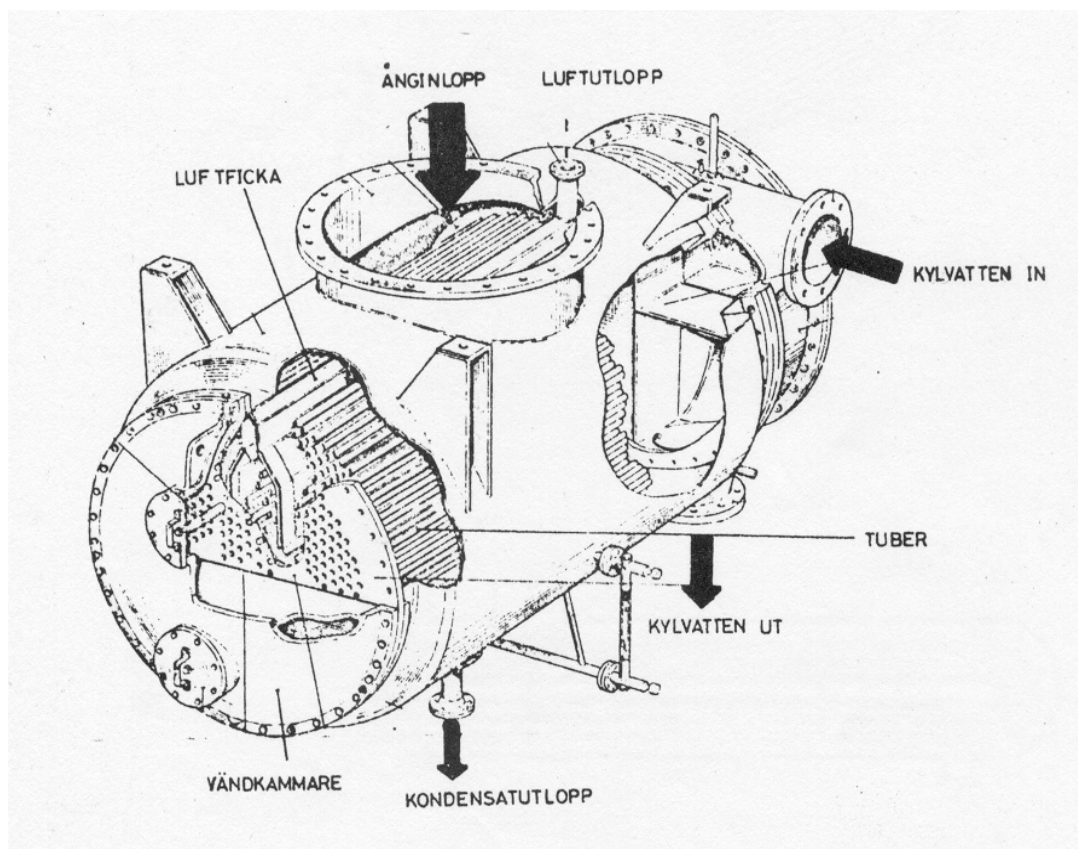
Figure 2.5.1-2 Draining condenser plant.



Figur 2.5.1-3 Ångpanna med direktkondensor.

Figure 2.5.1-3 Steam boiler with a condenser for district heating.

Kondensorn fungerar principiellt som en värmeväxlare där ånga och kondensat vanligtvis passerar kondensorn på utsidan av ett antal tuber placerade i ett tryckkärl (mantelsidan) medan kylmediet, vanligtvis kylvatten eller fjärrvärmevatten, passerar genom kondensorns tuber (tubsidan). De flesta kondensorer är konstruerade som konventionella tubvärmeväxlare med invalsade eller insvetsade tuber. I Figur 2.5.1-4 visas ett exempel på utformning av en kondensor.



Figur 2.5.1-4 Exempel på utformning av en kondensor (Leckner 1980).

Figure 2.5.1-4 Example of a layout of a condenser (Leckner 1980).

En stor kondensor kan ha upp till 15 000 tuber med en längd av upp till 10 m. Temperaturen på den ingående ångan kan för konventionella varmkondensorer ligga i intervallet 75 - 150 °C beroende på uppläggning. För varmkondensorer av typ direktkondensor ligger ingående ångtemperatur betydligt högre medan ingående ångtemperatur för kallkondensorer vanligtvis ligger lägre, ner mot 200°C beroende på typ av anläggning.

En kondensor kan vara tillverkad av ett flertal olika material. Materialvalet bestäms av parametrar såsom driftprocess, storleken på kondensorn, konstruktionsutförande, materialkostnader, tryck och temperatur i kondensorn, flödes hastigheter, ång- och vattenkemin på mantel- respektive tubsidan, driftsätt, etc. I Tabell 2.5-1 redovisas vanligt förekommande material i kondensorer. Bland dessa är kolstålet det mest förekommande i kondensorer genom sitt relativt låga pris.

**Tabell 2.5.1-1 Vanligt förekommande material i kondensorer (Tavast 1994).**

| Komponent     | Material                                                                                                                     |
|---------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Tuber         | Kolstål<br>Kopparlegeringar<br>Ferritaustenitiskt rostfritt stål<br>Ferritiskt rostfritt stål<br>Austenitiskt rostfritt stål |
| Stödplåtar    | Kolstål<br>Ferritaustenitiskt rostfritt stål<br>Ferritiskt rostfritt stål                                                    |
| Hölje         | Kolstål                                                                                                                      |
| Tubplåt       | Kolstål<br>Rostfritt (plätering)                                                                                             |
| Vattenkammare | Kolstål                                                                                                                      |

I undantagsfall, när vattenkemin är svår eller då andra processtekniska skäl kräver det, kan det bli aktuellt att tillverka kondensorns tuber i titan.

#### 2.5.1.1 Skador i kondensorer

Skador och i förlängningen läckage i en kondensor kan leda till oönskade konsekvenser såsom:

- Driftstörningar med minskad verkningsgrad och minskad tillgänglighet som följd.
- Att nödvändiga reparationer måste genomföras.
- Ökade krav på övervakning.
- Förorening av kondensatsidan medförande risk för sekundärskador på bl.a. panna och turbin.



Ett flertal olika skademekanismer kan inverka på skadeutvecklingen i en kondensors olika komponenter och material, se Tabell 2.5-2. De parametrar som bestämmer om skador ska utvecklas eller inte är kondensorns konstruktiva utformning, materialval, materialkvalitet, kemisk miljö under drift och under stillestånd, temperatur, strömningshastighet, driftsätt och vidtagna korrosionsåtgärder.

**Tabell 2.5-2** Tänkbara skademekanismer för olika material i kondensorer (Tavast 1994).

| Material         | Miljö                        | Skademekanism                                                                                                                                                    |
|------------------|------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Kolstål          | Kondenserande ånga           | Erosionskorrosion<br>Dropperosion<br>Avlagringskorrosion (gropfrätning)<br>Stilleståndskorrosion (gropfrätning)<br>Utmattning<br>Nötning<br>Korrosionsutmattning |
|                  | Kylvatten/Fjärrvärmevatten   | Avlagringskorrosion (gropfrätning)<br>Stilleståndskorrosion (gropfrätning)<br>Mikrobiell korrosion<br>Erosionskorrosion                                          |
| Kopparlegeringar | Kondenserande ånga           | Ammoniakangrepp<br>Spänningskorrosion<br>Utmattning<br>Nötning<br>Dropperosion                                                                                   |
|                  | Kylvatten/Fjärrvärmevatten   | Avlagringskorrosion (gropfrätning)<br>Stilleståndskorrosion (gropfrätning)<br>Korrosionsutmattning                                                               |
| Rostfritt        | Kondenserande ånga           | Spänningskorrosion (i austenitiskt material vid indunstning)<br>Gropfrätning<br>Dropperosion<br>Nötning<br>Utmattning                                            |
|                  | Kylvatten / Fjärrvärmevatten | Spaltkorrosion<br>Gropfrätning<br>Spänningskorrosion (i austenitiska material vid anrikning av klorider)                                                         |

Utgående från påträffandefrekvens kan skador i kondensorer indelas i korrosionsangrepp och övriga typer av skador där den senare gruppen domineras av dropperosion och utmattning. I en korrosiv miljö kan utmattningssprickor tillväxa vid lägre belastning än i en icke korrosiv miljö vilket brukar benämnas korrosionsutmattning. Denna typ av skada är vanligast lokaliserad till tubplåtarna.

Majoriteten av de skador som påträffas hör härifrån från kondensorns tuber varför dessa redovisas utförligare här nedan.

### Skador i kolstålstuber

De vanligast förekommande skadorna på kolstålstuber är utvändig erosionskorrosion och utvändig dropperosion i de yttre tubraderna och invändig gropfrätning i samtliga tuber. Mekanismerna för erosionskorrosion och dropperosion är helt olika. Trots detta kan det vara svårt att skilja på dessa angreppstyper vid en inspektion på plats. Vad gäller erosionskorrosion är angreppen på tuberna vanligtvis relativt utsträckta. Angreppsdjupet varierar samtidigt som den angripna ytan känns slät. Att det enbart är de yttre tubraderna (framförallt i närheten av ånginlopp) som angrips beror på ångans relativt höga strömningshastighet i detta område. Det av dropperosion angripna området är alltid vänt mot anströmmande ånga/vatten och uppvisar ofta en rå smärgelduksliknande yta. Inverkan av erosionskorrosion och allmänskorrosion kan medföra att ytan blir mindre rå. En anslagsvinkel på 90 ° utgör det värsta fallet.

Vid en undersökning av 27 tubsatser i kolstål (25 varmkondensorer och 2 direktkondensorer) påträffade man utvändig erosionskorrosion och/eller dropperosion i 67 % av de undersökta kondensorererna [2]. Den genomsnittliga nominella angreppshastigheten fastställdes till 0.12 mm/år.

Vid gropfrätning ökar angreppshastigheten med ökande syre- och/eller salthalt i kylvattnet/fjärrvärmevattnet. Bristande åtgärder vid stillestånd kan också medföra höga angreppshastigheter. Karakteristiskt för angrepp av typ gropfrätning är att största delen av ytan är fri från angrepp. Eftersom den stora, icke angripna ytan är passiv, accelereras angreppet galvaniskt. Angreppen är vanligtvis koncentrerade till botten av tuberna och finns under de ofta förekommande kraftiga magnetitavlagringarna, så kallade "krustor".

Vid en undersökning av 36 tubsatser i kolstål (34 varmkondensorer och 2 direktkondensorer) konstaterades invändig gropfrätning orsakad av avlagringskorrosion och/eller stilleståndskorrosion i 70 % av tubsatserna [2]. Den genomsnittliga nominella angreppshastigheten fastställdes till 0.06 mm/år.

Bland övriga påträffade skador kan nötning och utmattning på tuber genom strömnings-inducerade vibrationer nämnas. Dessa skador påträffas normalt vid stödplåtarna eller andra vid "rörelsehinder" och i de områden där flöden med hög kinetisk energi tillförs, exempelvis randtuber vid ång- eller dränageinlopp.

### Skador i kopparbaserade tuber

De vanligast förekommande skadorna på kopparbaserade tuber är utvändiga ammoniakangrepp. Känsligheten för ammoniakangrepp varierar för olika kopparmaterial. Ammoniakangrepp orsakas av höga lokala halter av icke kondenserbara gaser som ammoniak, syre och koldioxid i kondensatet på ångsidan. Motståndet mot denna typ av angrepp ökar i ordningen: amiralitetslegering - aluminium - mässing - Cu/Ni90/10 - CuNi70/30. Vid en undersökning av 7 kopparbaserade tubsatser (5 tubsatser med amiralitetslegering och 2 tubsatser med koppar) konstaterades utvändiga ammoniakangrepp på 57 % av dessa [2]. Den nominella angreppshastigheten varierar mellan 0.04 och ca 1.5 mm/år.

Insidig gropfrätning i kopparbaserade tubsatser orsakad av stilleståndskorrosion och/eller avlagringskorrosion har konstaterats i samband med en vattenkemi med hög salthalt. Angreppshastigheter på upptill 0.2 mm/år har uppmätts.

I kallkondensorer med tubsatser av kopparlegeringar har sprickbildning p.g.a. spänningskorrosion påträffats. Sprickorna har främst varit lokaliserade till övergången mellan den invaldade tubändan och den icke expanderande delen av tuben där de kvarvarande inre spänningarna (restspänningar) från invalsningsprocessen ofta är höga. Av de vanliga kopparlegeringarna är amiralitetslegering och aluminiummässing betydligt mera känsliga för spänningskorrosion än CuNi-legeringar. I mässing ökar risken för spänningskorrosion med ökande zinkhalt.

#### Skador i rostfria tuber

För att tidigare ha varit ett relativt sällan använt tubmaterial i kondensorer har en ökning av rostfria tuber konstaterats under senare år. Då antalet kondensorer med rostfria tubsatser är relativt få saknas dock någon större erfarenhet över vilka skador som är att vänta. Risken för gropfrätning och spaltkorrosion i rostfria tuber i varmkondensorer torde vara låg. En hög kloridhalt i fjärrvärmevattnet skulle dock kunna innebära en risk, speciellt vid anrikning genom indunstning av fjärrvärmevattnet under stillestånd. Svårigheten att undvika avlagringar och eventuella konstruktiva spalter medför att det normalt är spaltkorrosion snarare än gropfrätning som är begränsande för livslängden för rostfria tuber. Risken för lokala korrosionsangrepp i kloridhaltiga miljöer ökar normalt med ökande temperatur.

Svetsning kan medföra sensibilisering av de enklare austenitiska rostfria stålen som i sin tur kan leda till interkristallina korrosionsangrepp i den värmepåverkade zonen.

Spänningskorrosion i kondensorer med tubsatser av austenitiskt rostfritt stål är ovanligt samtidigt som det inte kan uteslutas. Risken för att denna typ av skada ska uppstå är i första hand beroende av temperaturen, den lokala kloridhalten, spänningsnivån och materialkvaliteten. Med en kritisk vattentemperatur på 50 - 60 °C, under vilken risken för spänningskorrosion i austenitiskt rostfritt stål kan försummas, följer att sannolikheten för spänningskorrosion i kallkondensorer är mycket liten.

#### *2.5.1.2 Provning av kondensorer*

Resultat från oförstörande såväl som förstörande provning av de olika komponenterna i en kondensor bildar ett viktigt underlag vid bedömning av kondensorns kondition och återstående livslängd. Ett flertal provningsmetoder finns tillgängliga och valet av provningsmetod styrs av ett flertal krav såsom [2]:

- Provningsmetoden ska fungera för aktuellt material och konstruktionsutförande på kondensorn.
- Möjlighet att skilja på invändiga och utvändiga angrepp på tuber.
- Lokala såväl som långsträckta angrepp ska kunna upptäckas.
- Skador i anslutning till stödplåtar ska kunna indikeras.
- Påträffade skador ska kunna delas in efter angreppsdjup med tillräcklig noggrannhet.
- Ett stort antal tuber ska kunna provas på kort tid.
- Utvärderingen ska vara enkel och så objektiv som möjlig.
- Repeterbarheten är viktig för att möjliggöra uppföljning av påträffad skada vid åter-kommande mätningar.
- Provningsutrustningen bör vara kompakt och oöm.
- Kostnaden för provningen ska stå i rimlig proportion till kostnaderna för påtvingade stopp under driftsäsongen.

För att uppnå bästa resultat vid provningen bör provningsutrustningen kalibreras mot kända och verklighetsnära defekter samt erhållna provningsresultat verifieras genom undersökning av uttagna tuber alternativt genom provning med en andra provningsmetod. För samtliga provningsmetoder gäller att tjocka avlagringar inverkar störande och bör avlägsnas. Vad gäller tuber rekommenderas invändig högtrycksspolning innan provningen påbörjas. Det är vidare viktigt att provning och utvärdering av provningsresultat görs av erfaren och kompetent personal samt att provningspersonalen har god kunskap om förekommande skademekanismer.

#### Oförstörande provning av icke magnetiska tuber

Till gruppen icke magnetiska tuber räknas tuber av kopparlegeringar och austenitiskt rostfritt stål. För oförstörande provning av dessa tuber används konventionell virvelströmprovning där en sond förs genom tuberna. In- och utvändiga defekter utläses som störningar i det virvelströmfältet sondens spole/spolar skapar. För indikering av lokala angrepp användes absolutmätning (en spole i sonden) medan differentialmetoden (två på varandra följande spolar i sonden) används för indikering av mer gradvisa långsträckta angrepp. Defekter ner till ett djup av 10 % av tubens väggjocklek kan detekteras.

#### Oförstörande provning av svagt magnetiska tuber

Till gruppen svagt magnetiska tuber räknas tuber av ferritiskt och ferritaustenitiskt rostfritt stål. För oförstörande provning av dessa tuber kan konventionell virvelströmprovning med mättnadsmagnetisering användas under förutsättning att väggjockleken inte är för stor.

#### Oförstörande provning av magnetiska tuber

Till gruppen magnetiska (ferritiska) tuber räknas kolstålstuber. Oförstörande provning av denna tubtyp är betydligt svårare än provning av icke magnetiska tuber. Detta höjer kraven ytterligare på den personal som ska genomföra och utvärdera provningen.

Två olika typer av provningsmetoder är att tillgå, elektromagnetiska metoder och metoder baserade på ultraljudteknik. Till den första metoden räknas "Remote Field Eddy Current", RFEC. RFEC-tekniken innebär att störningar (p.g.a. defekter) i ett fält av lågfrekventa virvelströmmar mäts på ett större avstånd från den virvelströmalstrande spolen (sändaren) än vid konventionell virvelströmprovning. Detta "avlägsna" virvelströmfält har en betydligt större genomträngningsförmåga i magnetiskt material än virvelströmfältet i närheten av sändaren. Efter kalibrering mot verklighetsnära och kända defekter kan angrepp ned mot 20 % av tubens väggjocklek detekteras.

En annan metod som bygger på magnetism är magnetisk läckflödesmätning. Genom mätning av störningar i det magnetiska flödet kan in- och utvändiga defekter detekteras. För denna metod används en sond som normalt innehåller en kraftig permanentmagnet, två induktionsspolar och en så kallad Halleffektsensor. Genom att jämföra mätdata från tre kanaler kan in- och utvändiga, lokala såväl som gradvisa axiellt utsträckta angrepp indikeras. Efter kalibrering mot verklighetsnära och kända defekter kan defekter ner till ett djup av 20 % av tubens väggjocklek detekteras med magnetisk läckflödesmätning.

### Ultraljudprovning av tuber

Vid ultraljudprovning av tuber är det vanligt att använda en provningsteknik där ljudvågorna sveps över tubens inneryta med hjälp av roterande speglar. Rotationen av speglarna åstadkoms med hjälp av en vattenturbin eller en elektrisk motor som är inbyggd i sonden. Fördelarna med denna metod är att signalerna är relativt lättolkade och att defekter ner till ett djup av 10 % av tubens vägg tjocklek kan detekteras. Till nackdelarna hör att denna provningsteknik är långsammare än de elektromagnetiska provningsmetoderna. Sammantaget innebär detta att ultraljudprovning med roterande speglar nyttjas för verifiering av andra provningsmetoder, vid provning av ett mindre antal tuber samt vid noggrannare provning för indata till en mer förfinad analys av återstående livslängd.

### Förstörande provning av tuber

För att närmare studera skadade tuber och för verifiering av provningsresultat, erhållna genom oförstörande provningsmetoder, görs uttag av tuber.

### Provning av övriga komponenter

För provning av övriga komponenter i en kondensor nyttjas framförallt följande oförstörande provningsmetoder:

- Visuell kontroll.
- Magnetpulverprovning eller penetrantprovning för ytlig sprickindikering.
- Ultraljudprovning för godstjockleksmätning, volymetrisk provning och för karakterisering av påträffade defekter.

#### *2.5.1.3 Bedömning av återstående livslängd hos kondensorer*

Möjligheten att med en hygglig noggrannhet bestämma återstående livslängd hos en kondensor är beroende på vilken eller vilka skademekanismer som är aktuella. Baserat på tidigare erfarenheter från fortlöpande kontroller är det ofta möjligt att uppskatta effekten av skademekanismer såsom erosionskorrosion, dropperosion, gropfrätning och ammoniakangrepp. Vad gäller mekanismer såsom utmattningskorrosion, korrosionsutmattningskorrosion och spänningskorrosion är det däremot betydligt svårare att med någon större noggrannhet bestämma med vilken hastighet den utsatta komponenten degenereras. Detta beroende på att angreppen p.g.a. dessa mekanismer kan uppträda mycket plötsligt.

En bedömning av en kondensors kondition och återstående livslängd bör baseras på:

- Historik och statistik från anläggningen.
- Kunskap om aktuella skademekanismer.
- Resultat från inspektioner och oförstörande provning.
- Resultat från undersökning av uttagna representativa tuber.

Varje anläggning är unik varför det är omöjligt att exakt ange angreppshastigheter för olika skademekanismer, komponenter och material. Av störst värde som indata till livslängdsanalysen är resultat från den fortlöpande kontrollen av den egna kondensorn. Härigenom erhålls empiriskt framtagna data som är unika för den egna anläggningen. Nedan anges nominella angreppshastigheter baserade på en undersökning av ett flertal kondensorer (Tavast 1994), se Tabell 2.5-3.

**Tabell 2.5-3** Nominella angreppshastigheter i olika tubmaterial som funktion av skademekanism.

| Tubmaterial      | Skademekanism                   | Nominell angreppshastighet (mm/år) |
|------------------|---------------------------------|------------------------------------|
| Kolstål          | Erosionskorrosion/Dropp-erosion | 0.12                               |
|                  | Gropfrätning (utvändig)         | 0.03                               |
|                  | Gropfrätning (invändig)         | 0.06                               |
| Kopparlegeringar | Ammoniakangrepp (utvändiga)     | 0.04 - 1.5                         |

### Åtgärder vid skador

Vilka åtgärder som bör vidtas vid påträffande av skador är beroende på ett flertal parametrar. I vissa fall är det nödvändigt att orsaken till att skadan uppstått måste elimineras (utmattning, korrosionsutmattning och spänningskorrosion) medan det i andra fall är frågan om förväntad förslitning av komponenten resulterande i ett utbyte. I Tabell 2.5-4 sammanfattas några åtgärder för olika uppkomna skador.

**Tabell 2.5-4** Åtgärder vid uppkomna skador (Tavast 1994)

| Komponent     | Typ av skada                                 | Åtgärd                                                                                                                                                                                                                                                             |
|---------------|----------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Kolstålstuber | Erosionskorrosion i de yttre tubraderna      | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Preventivpluggning av skadade tuber.</li> <li>• Omtubning av de yttre tubraderna med förslagsvis rostfria tuber.</li> <li>• Ökad dosering med ammoniak för att höja pH-värdet.</li> </ul>                                 |
|               | Dropperosion i de yttre tubraderna           | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Preventivpluggning av skadade tuber.</li> <li>• Installation alt. modifiering av strömningsskydd.</li> <li>• Omtubning av de yttre tubraderna med förslagsvis rostfria tuber.</li> <li>• Omlänkning av flödet.</li> </ul> |
|               | Gropfrätning (utvändig)                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Kontrollera ångans salthalt och anpassa enligt rekommendationer.</li> </ul>                                                                                                                                               |
|               | Gropfrätning (invändig)                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Kontrollera spädvattnets och fjärrvärmvattnets/kylvattnets kvalitet och anpassa enligt riktlinjer.</li> </ul>                                                                                                             |
| Kolstålstuber | Nötning, utmattning och korrosionsutmattning | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Vid mindre skador, stagning av tuberna med "hårnålar".</li> <li>• Vid mer omfattande skador, utbyte av tubsats tillsammans med kortare avstånd mellan stödplåtar.</li> </ul>                                              |

| Komponent            | Typ av skada                                 | Åtgärd                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|----------------------|----------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Kopparbaserade tuber | Ammoniakangrepp (utvändiga)                  | <ul style="list-style-type: none"> <li>Kontrollera ångans ammoniakhalt. Vid eventuell sänkning av ammoniakhalten</li> <li>Partiell omtubning med ett material med bättre motstånd mot ammoniakangrepp, vanligtvis CuNi-legering.</li> </ul>                            |
|                      | Nötning, utmattning och korrosionsutmattning | <ul style="list-style-type: none"> <li>Vid mindre skador, stagning av tuberna med "hårnålar".</li> <li>Vid mer omfattande skador, utbyte av tubsats tillsammans med kortare avstånd mellan stödplåtar.</li> </ul>                                                      |
|                      | Dropperosion i de yttre tubraderna           | <ul style="list-style-type: none"> <li>Preventivpluggning av skadade tuber.</li> <li>Installation alt. modifiering av strömningsskydd.</li> <li>Omtubning av de yttre tubraderna med förslagsvis rostfria tuber.</li> <li>Omlänkning av flödet.</li> </ul>             |
| Rostfria tuber       | Gropfrätning och spaltkorrosion              | <ul style="list-style-type: none"> <li>Kontrollera kloridhalt i ångan respektive kyl-/fjärrvärmevattnet och anpassa efter rekommendationer.</li> </ul>                                                                                                                 |
|                      | Spänningskorrosion                           | <ul style="list-style-type: none"> <li>Kontrollera kloridhalt i ångan respektive kyl-/fjärrvärmevattnet och anpassa efter rekommendationer.</li> <li>Tuber i austenitiskt rostfritt stål kan bytas till ferritiskt eller ferritaustenitiskt rostfritt stål.</li> </ul> |
|                      | Dropperosion i de yttre tubraderna           | <ul style="list-style-type: none"> <li>Preventivpluggning av skadade tuber.</li> <li>Installation alt. modifiering av strömningsskydd.</li> <li>Omtubning av de yttre tubraderna med förslagsvis rostfria tuber.</li> <li>Omlänkning av flödet.</li> </ul>             |
| Rostfria tuber       | Nötning och utmattning                       | <ul style="list-style-type: none"> <li>Vid mindre skador, stagning av tuberna med "hårnålar".</li> <li>Vid mer omfattande skador, utbyte av tubsats tillsammans med kortare avstånd mellan stödplåtar.</li> </ul>                                                      |

## REFERENSER

Leckner B. 1980. Energiteknik. Institutionen för ångteknik, Chalmers Tekniska Högskola, Göteborg.

Tavast J. 1994. Skademekanismer i värmekondensorer, Värmeforskrappport nr 500.



## 2.5.2 Bränslesystem

### Övergripande beskrivning av bränslesystem

Ett stort antal olika bränslesystem avsedda för gasformiga, flytande, pulverformiga och andra fasta bränslen förekommer i svenska kraftvärmeverk. Ofta kombineras flera bränsleslag i samma anläggning genom att kombinationsbrännare installerats eller att brännare installeras ovanför en rost. Bränslesystemen är anpassade för varje anläggning med stora variationer i utformning, speciellt i de fastbränsleeldade anläggningarna. Den ursprungligen installerade utrustningen har ofta anpassats till andra bränslen än som den dimensionerats för.

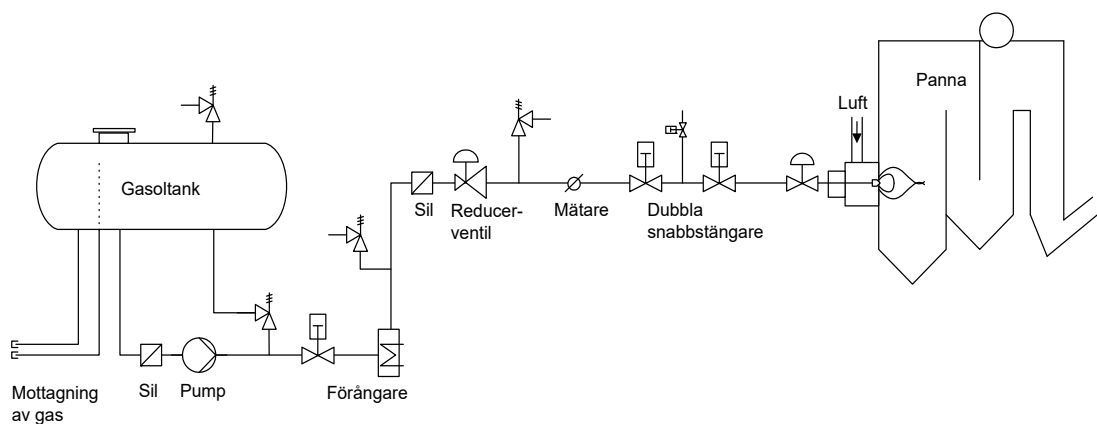
De flesta störningar som förekommer i bränslesystem på till exempel rör, armatur, värmeväxlare, transportörer, kvarnar, siktar är slitageskador som åtgärdas vid anläggningens normala underhåll. En bedömning av återstående livslängd kan göras för varje enskild komponent, speciellt bör livslängden bedömas för komponenter med hög investeringskostnad som bränslelager, kvarnar och dylikt.

Vid en bedömning av återstående livslängd för hela bränslesystemet måste hänsyn tas till om investeringar för ett utbyte av systemet, eller delar av det, kan ekonomiskt motiveras genom att kostnaderna för underhåll, skötsel eller tillgänglighet kan minskas eller att andra billigare bränslen kan utnyttjas.

#### 2.5.2.1 Gasformiga bränslen

Med gasformiga bränslen avses naturgas, stadsgas, gasol och processgas (till exempel koksugns gas). Gasen leds in i anläggningen med en rörledning från ett gasnät eller en lagercistern. Ledningstrycket före anläggningen beror på typ av gas och lokalisering av anläggningen. I anläggningen reduceras trycket till ett för brännaren anpassat tryck vanligen ca 1 bar(ö) eller lägre. Efter en reducentventil finns gasmätare, snabbstängningsventiler och vid brännaren en lastreglerventil.

I Figur 2.5-5 nedan visas ett exempel på ett system för gasol.



**Figur 2.5-5** Bränslesystem för gasol  
**Figure 2.5-5** Fuel system for propane

#### 2.5.2.1.1 Skador i system för gasformiga bränslen

Dessa system har normalt få skador. Markförlagda cisterner och ledningar under mark kan vara utsatta för utvändig korrosion. Om fukt kommer in i systemen kan även korrosion förekomma på insidan av cisterner och rörledningar.

Slangar och anslutningar för lossning från bil eller tankvagnar kan skadas.

#### 2.5.2.1.2 Provning av system för gasformiga bränslen

Lagercisterner speciellt cisterner som är förlagda under jord, rör, slangar, sprinklersystem, armatur inspekteras visuellt.

#### 2.5.2.1.3 Återstående livslängd hos system för gasformiga bränslen

Samtliga komponenter i gassystemen besiktigas regelbundet av auktoriserade besiktningsmän. Vid en livslängdsundersökning bör besiktningsprotokoll från senare år genomgås och eventuella anmärkningar följas upp.

Den återstående livslängden bedöms genom extrapolering av upptäckta skador, till exempel minskad godstjocklek på grund av korrosion.

#### 2.5.2.2 Flytande bränslen

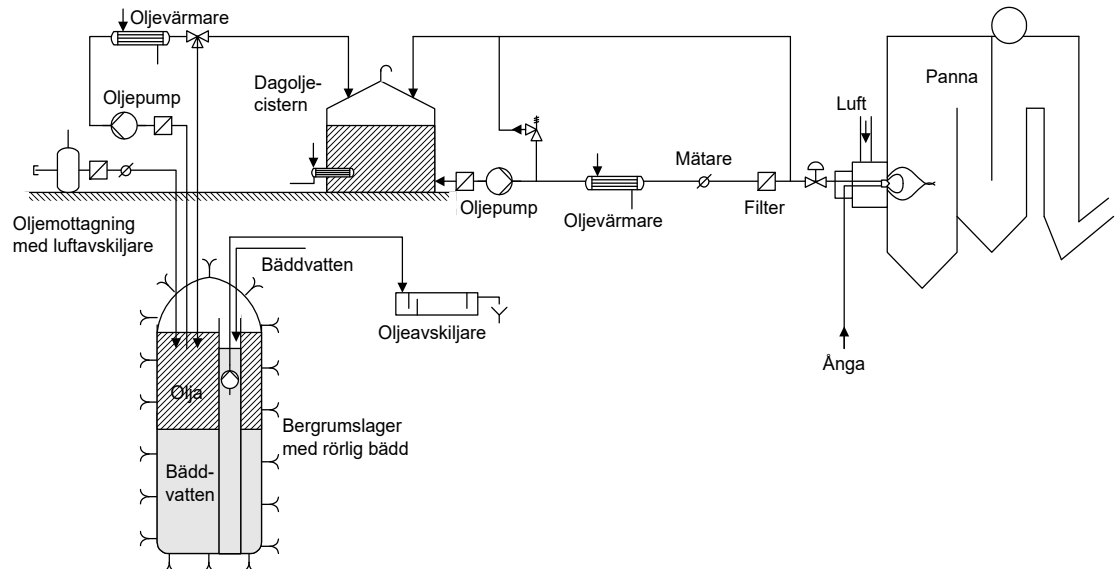
Med flytande bränslen avses olika förbränningsoljor från lättflytande till trögflytande fraktioner samt olika oljor som härrör från massaindustrin till exempel tallbecksolja.

Oljan pumpas från en lagercistern, eller från ett bergrum ofta via en dagoljecistern, genom värmeväxlare för uppvärmning till rätt viskositet och sedan till brännarna. Samtliga oljeledningar är vid trögflytande oljor försedda med utrustning för varmhållning med antingen följorör med ånga eller hetvatten eller med elvärmekablar. Oljecisterner kan varmhållas av olja som cirkuleras genom förvärmare i anläggningen eller med insticksförvärmare i cisternen. För att minimera risk för att olja skall läcka in i andra system är förvärmarna ofta byggda i dubbelmantlat utförande eller med ett från övriga media i anläggningen separerat värmemedium. Olja återcirkuleras till oljecisternen för flödesreglering, tryckhållning och varmhållning.

Brännarna startas ofta på gasol som förvaras i gasflaskor utanför pannhusväggen.

Om enbart lättolja eldas finns endast behov av mindre värmning av enbart oljecisternen under vintern. Om speciell vinterolja används behövs inte heller denna uppvärmning.

I Figur 2.5-6 nedan visas ett typiskt system för tjock eldningsolja med lager i bergrum.



**Figur 2.5-6 Bränslesystem för tjock eldningsolja**

**Figure 2.5-6 Fuel system for heavy fuel oil**

#### 2.5.2.2.1 Skador i system för flytande bränslen

Ledningar för eldningsoljor är normalt inte utsatta för erosion eller korrosion varför risk för invändiga skador är liten. Vid användning av tallbecksolja kan dock erosionsskador förekomma på ledningar, pumpar, dysor och annan utrustning. Ledningar för bäddvatten vid berggrumsanläggningar kan vara utsatta för korrosion.

Sprickor i bergrum kan medföra att väggar och tak kan behöva förstärkas. Slam kan ha ansamlats i lagret så att en rengöring kan behövas.

Cisterner kan ha korrosionsskador i botten om vatten inte dränerats ut. Fyllnadsmaterial under cisternbotten kan även ha satt sig och återfyllning kan behövas. Underjordiska cisterner kan även korrodera på utsidan om dräneringen kring cisternerna är otillräcklig.

Värmeväxlare, i synnerhet värmeväxlare för bäddvatten, kan skadas genom korrosion eller erosion på sidan för uppvärmande medium.

#### 2.5.2.2.2 Provning av system för flytande bränslen

Bergrum inspekteras med avseende på sprickbildning. Vattennivån i kringliggande berg kontrolleras så att denna överstiger högsta oljenivå i lagret så att utläckage av olja förhindras. Mängden slam i botten på lagret kontrolleras.

Cisterner ovan jord inspekteras invändigt med tanke på korrosionsskador i botten och deformation av bottenplåtar orsakade av otillräckligt fyllningsmaterial under bottenplåtarna. Cisterner under mark inspekteras även på utsidan. På misstänkta partier undersöks godstjockleken med ultraljudsprovning.

Värmeväxlare inspekteras visuellt och provtrycks för att upptäcka eventuella läckage.

Rör och armatur i bäddvattensystem inspekteras med tanke på korrosionsskador. Ledningarna provtrycks för att upptäcka eventuella läckor.

Oljeavskiljare inspekteras med tanke på korrosion på avskiljarens insida.

Oljor som innehåller slitande eller korrosiva ämnen inspekteras brännarlansar, munstycken rörböjar, pumpar, armatur med hänsyn till erosions- och korrosionsskador.

#### 2.5.2.2.3 Återstående livslängd hos system för flytande bränslen

Återstående livslängd hos bergrumslager bedöms med utgångspunkt från upptäckta skador på bergrumsväggar efter konsultation på experter på området.

För cisterner, värmeväxlare, rör och armatur med så svåra skador att en reparation inte är möjlig bedöms återstående livslängd så att god marginal mot läckage finns vid en uppskattad fortsatt reduktion av materialets godstjocklek.

#### 2.5.2.3 Pulverformiga bränslen

Med pulverformiga bränslen avses i huvudsak kolpulver, torvpulver och träpulver. Bränslet transporteras vanligen till anläggningen och lagras i en grövre fraktion. Vid trä- och torvpulver är råvaran ett torkat material i form av pellets eller briketter. Detta mals sedan i anläggningen efter behov. I några anläggningar levereras dock pulvret med rätt fraktion direkt till anläggningen.

Bränslet kan antingen malas centralt i en för flera pannor gemensam malningsanläggning eller med separata kvarnar vid varje panna.

Vid central malning transporteras det färdiga pulvret från kvarnanläggningen som kan vara placerad nära bränslelagret till en eller flera dosersilos vid varje panna. Från dessa fördelas sedan pulvret till pannans brännare efter behov.

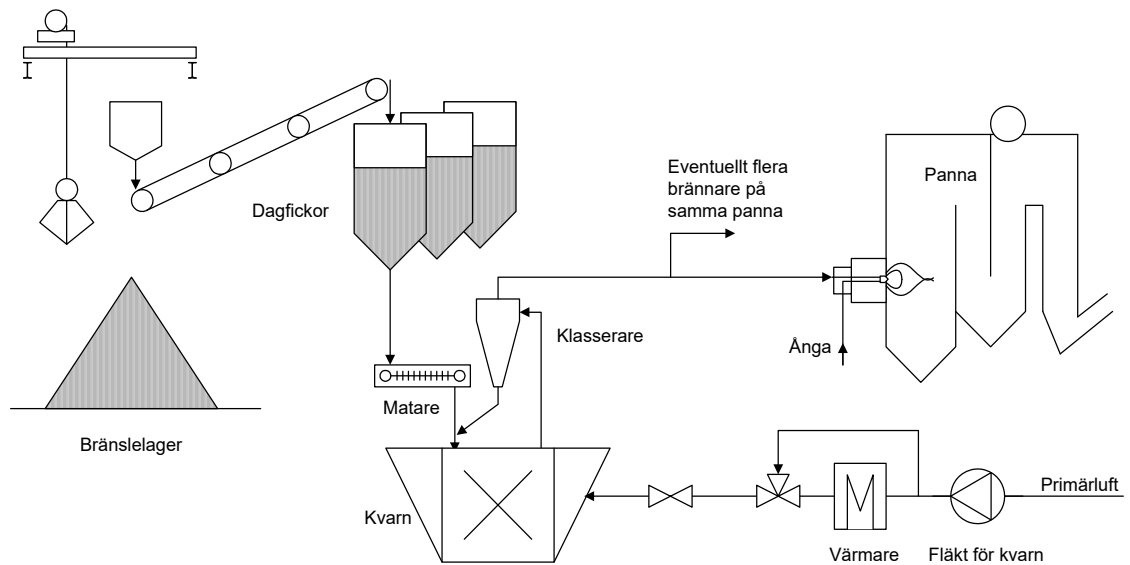
I det andra fallet transporteras det obehandlade bränslet till en eller flera dagfickor vid varje panna. Från dessa fickor tillförs bränslet till en eller flera kvarnar som är direkt anslutna till brännare på en panna. En kvarn kan betjäna flera brännare. Bränslemängden till brännarna styrs av en matare som matar råmaterialet till kvarnen.

Det finns ett flertal kvarntyper, till exempel hammarkvarnar, kulkvarnar, valskvarnar. Pulvret transporteras genom kvarnen med luft, ofta förvärmad, eller med inerta gaser. I kvarnens utlopp eller i bränsleledningen siktas pulvret i klasserare och överstort material återförs till kvarnen.

Brännarna startas ofta på annat bränsle till exempel olja tills en viss pannlast uppnåtts innan pulvret tillsätts.

Explosioner och bränder kan förekomma i ledningar och kvarnar. Systemen är därför vanligen utrustade med gnistvarningssystem.

I Figur 2.5-7 nedan visas ett exempel på en anläggning med en kvarn vid pannan.



**Figur 2.5-7 Bränslesystem för pulver**

**Figure 2.5-7 Fuel system for powder**

#### 2.5.2.3.1 Skador i system för pulverformiga bränslen

Stora delar av bränslesystem för pulver är utsatta för svårt slitage med erosionsskador som följd. Vissa delar byts eller repareras varje år. Exempel på utsatta delar är rör för pneumatisk transport och då speciellt böjar, transportörer, till exempel transportskrivar och skraptransportörer. I kvarnar slits malbord, kulor, rullar, slagor, roter etcetera. I malbord kan sprickbildning uppträda.

Då allt pulver har låg fukthalt är risken för korrosionsskador låg. Korrosion kan möjligen uppkomma efter vattenbegjutning av pulver i samband med släckning av bränder.

#### 2.5.2.3.2 Provning av system för pulverformiga bränslen

Godstjockleken mäts genom ultraljudprovning på rörledningar för pulver på ställen där erosionsskador bedöms kunna uppkomma.

Bränslelager, transportörer, matare och kvarnar inspekteras visuellt. Sprickbildning i malbord undersöks med penetrant- eller magnetpulverprovning.

#### 2.5.2.3.3 Återstående livslängd hos system för pulverformiga bränslen

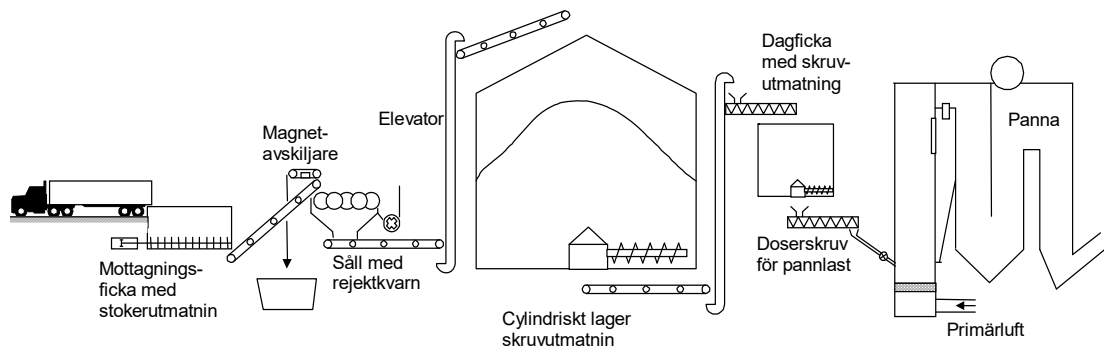
Huvuddelen av de skador som uppkommer i bränslesystem för pulver åtgärdas genom utbyte eller reparation av skadade delar.

Återstående livslängd kan bedömas för de enskilda komponenterna efter genomgång av skadeutvecklingen genom åren. En ökande skadefrekvens kan ge en indikation på komponentens återstående livslängd.

#### 2.5.2.4 Övriga fasta bränslen

Med övriga fasta bränslen avses kol, torv, flis, spån, bark, avfall etc. Dessa bränslen varierar mycket i värmevärde, fukthalt och styckestorlek. Bränslehanteringssystemen specialbyggs för de bränslen som anläggningen har byggts för varför stora variationer i utformning förekommer.

I Figur 2.5-8 nedan visas en tänkbar installation för flis.



**Figur 2.5-8 Bränslesystem för flis**

**Figure 2.5-8 Fuel system for wood chips**

De olika fasta bränslena lagras i anläggningen till exempel på hårdgjord yta utan väderskydd, i A-lador, i plåtcisterner, i bunkrar, i bergrum och transporteras till exempel med skopplastare, stokrar, bandtransportörer, skrapor, skruvar, elevatorer, traverser med skopor. Ibland sållas och mals materialet och magnetiska föroreningar i bränslet avskiljs.

Hantering av fasta bränslen är ofta dammig varför utrustning för dammavskiljning är vanlig. Dammet medför även risk för dammexplosioner. Slutna lager är därför ofta utrustade med luckor för tryckavlastning.

Utrustning för detektering och släckning av bränder är ofta installerad.

##### 2.5.2.4.1 Skador i system för fasta bränslen

Utrustning för hantering av fasta bränslen är utsatt för svårt slitage med erosionsskador som följd. Många delar som transportörer, kvarnar, såll med mera måste underhållas och bytas regelbundet. I kvarnar slits framförallt slagor och roster.

Fuktiga bränslen kan ge korrosionsskador på lagercisterner och annan utrustning byggd av kolstål.

##### 2.5.2.4.2 Provning av system för fasta bränslen

Mottagningsfickor, stålcisterner, A-lador, inspekteras visuellt med tanke på korrosions- och erosionsskador. Materialet i dessa delar kan även uppvisa deformationsskador orsakade av lastbilar, truckar eller lastmaskiner.

Väggar och tak i betongsilos och bergrum inspekteras med tanke på sprickor eller sönderfallande material.

Transportörer, rör för pneumatisk transport, traverser, kranar, filter, kvarnar, såll och dylik utrustning inspekteras visuellt med tanke på korrosions- och erosionsskador.

Funktion på säkerhetsutrustning som brandvatten, gnistsläckningssystem explosionsluckor på cisterner och nödstopp provas.

#### 2.5.2.4.3 Återstående livslängd hos system för fasta bränslen

Huvuddelen av de skador som uppkommer i bränslesystem för fasta bränslen åtgärdas genom utbyte eller reparation av skadade delar.

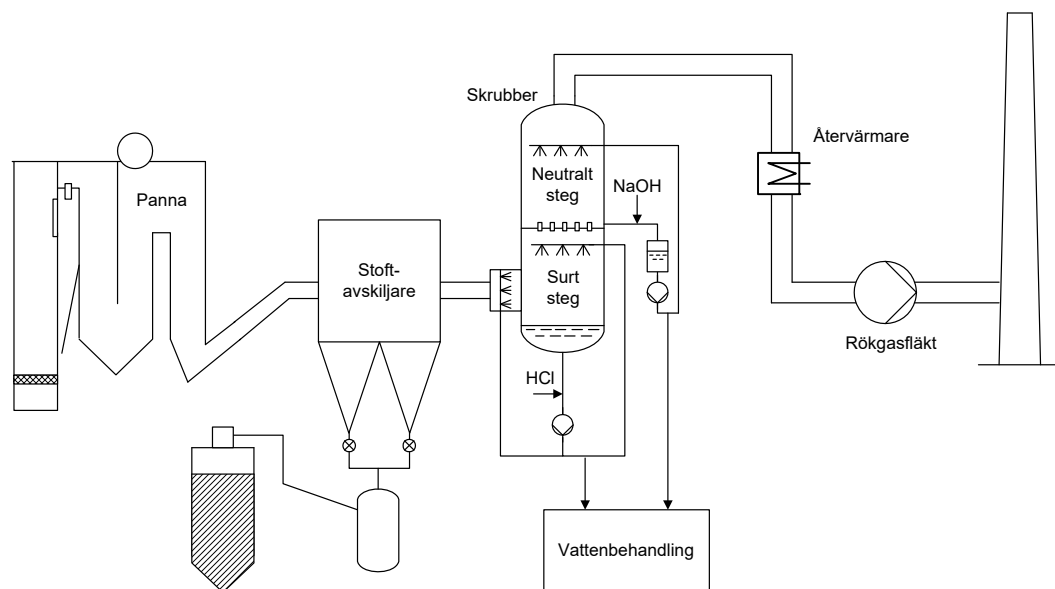
Återstående livslängd kan bedömas för de enskilda komponenterna efter genomgång av skadeutvecklingen genom åren. En ökande skadefrekvens kan ge en indikation på komponentens återstående livslängd.

### 2.5.3 Rökassystem

I rökassystemet efter pannan ingår utrustning för rening av rökgas från stoft och ibland även andra komponenter, värmeåtervinning, återvärmare, rökgasrecirkulation, skorsten och vid anläggningar med balanserat drag rökgasfläktar. I systemet ingår även kanaler med spjäll, ljuddämpare och kompensatorer.

De största problemen med all utrustning efter pannan orsakas av invändig korrosion som uppkommer om daggpunkten för vattenånga eller sura ämnen i rökgaserna underskrids samt beläggning av de rökgasberörda ytorna med stoft.

I Figur 2.5-9 nedan visas ett exempel på en rökgasrening med våt rening vid förbränning av avfall.



**Figur 2.5-9** Exempel på rökassystem

**Figure 2.5-9** Example of a flue gas system

#### 2.5.3.1 Kanaler

De olika delarna i rökassystemet förbinds med kanaler. Materialet är vanligen låglegerat kolstål eller låglegerade så kallade rosttröga stål. I anläggningar med våt



rening förekommer rostfria austenitiska stål eller duplexstål samt olika plastmaterial, till exempel GAP.

I kanalerna kan ljuddämpare, spjäll, ledskeneapparater, kompensatorer av stål eller väv, luckor med mera vara installerade. Före stoftavskiljare kan kanalerna vara utsatta för hög stoftbelastning med temperaturer på 120 till 250°C. Efter en våt rening kan temperaturen vara så låg som 35- 40°C och vara mättad på fukt.

Trycket i kanalerna ligger inom området mellan ca 2 000 Pa övertryck till ca 4 000 Pa undertryck

#### 2.5.3.1.1 Skador i kanaler

Vanliga skador på kanaler och utrustning i kanalerna är korrosionsskador orsakade av att daggpunkten för vattenånga eller sura komponenter i gasen underskrids. Skadorna förekommer speciellt på punkter där väggarna är dåligt isolerade, vid luckor samt om köldbryggor förekommer vid stöd eller förstärkningar i väggarna. Kanaler för rökgasrecirkulation som ibland ställs av och därmed kyla är speciellt utsatta.

I områden med hög stoftbelastning kan även erosionsskador förekomma på grund av stofthaltig gas träffar kanalytor, spjällblad etcetera med hög hastighet. Erosion är vanlig vid omlänkning av gaser.

Kompensatorer av stål eller väv kan vara skadade om otillåtna förskjutningar förekommit. Läckage vid kompensatorerna eller ansamling av kondensat i bälgveck kan ge upphov till korrosionsskador.

#### 2.5.3.1.2 Provning av kanaler

All utrustning rengörs och inspekteras visuellt invändigt med tanke på korrosions- och erosionsskador. Vid upptäckta skador bestäms godsavverkningen genom att materialets godstjocklek på skadade partier mäts med ultraljudsprovning.

#### 2.5.3.1.3 Återstående livslängd hos kanaler

Om skadorna är av så stor omfattning att en reparation inte är möjlig bedöms återstående livslängd för kanalerna genom att upptäckta skador extrapoleras. Återstående livslängd innebär att viss marginal till uppskattat genombrott av materialet finns.

#### 2.5.3.2 Stoftrening

Stoft i rökgaserna avskiljs i stoftfilter av cyclontyp, elfilter eller slangfilter. Stoftfickor är normalt utformade med utrustning för varmhållning och ibland med slagverk, luftkanoner eller dylikt för att underlätta uttransport av material och minska korrosionen.

Materialet är vanligen låglegerat kolstål eller låglegerade så kallade rosttröga stål.

##### 2.5.3.2.1 Skador i stoftrening

Vanliga skador på utrustning för stoftrening är korrosionsskador orsakade av att daggpunkten för vattenånga eller sura komponenter i gasen underskrids. Skadorna förekommer speciellt på punkter där filterväggarna är dåligt isolerade, vid luckor samt om köldbryggor förekommer vid stöd eller förstärkningar i väggarna. Stoftfickor under filtren med otillräcklig uppvärmning är speciellt utsatta för korrosion.

Erosionsskador kan förekomma framförallt i inloppet till filtren.

Elektroder och rensningssystem i elfilter slits och kan ha tagit skada vid till exempel stoftbränder. Slangar slits och byts efter viss drifttid. Slangar kan även sättas igen vid olämpliga driftförhållanden. Rensningsanordningar för cykloner och slagverk i elfilter kan vara skadade.

#### 2.5.3.2.2 Provning av stoftrening

Filtret rengörs och inspekteras visuellt invändigt med tanke på korrosions- och eventuellt erosionsskador. Vid upptäckta skador bestäms godsavverkningen genom att materialets godstjocklek på skadade partier mäts med ultraljudsprovning.

En mätning av stoft före och efter filtret bör genomföras för att avgöra om utrustningens avskiljningsförmåga har försämrats jämfört med konstruktionsdata.

#### 2.5.3.2.3 Återstående livslängd hos stoftrening

Om upptäckta skador på materialet är av så stor omfattning att en reparation inte är möjlig bedöms återstående livslängd för stoftavskiljarens hölje och stoftfickor genom att skadorna extrapoleras. Återstående livslängd innebär att det finns tillräcklig marginal till ett uppskattat genombrott av godset fram till nästa inspektion.

En bedömning bör genomföras av om avskiljningsgraden har försämrats och om den förväntas försämrats ytterligare så gällande eller förväntade framtida miljökrav inte kommer att klaras.

#### 2.5.3.3 Torr eller halvtorr rökgasrening

En del anläggningar har utrustats med en torr eller halvtorr rening där förutom stoft även gasformiga föroreningar avskiljs. Vid dessa metoder injiceras ofta en eller flera absorbenter. Den vanligaste absorbenten är kalciumhydroxid. Absorbenten injiceras i reaktorer eller direkt i kanalen före en stoftavskiljare. Reaktionen mellan absorbenter och de ämnen som skall avskiljas sker delvis i reaktorn och delvis i den efterföljande stoftavskiljaren.

Kalciumhydroxid tillverkas ibland i anläggningen genom släckning av kalciumoxid.

De vanligaste driftstörningarna beror, i synnerhet vid halvtorra reningsmetoder, på stoftbeläggning på väggar och slitage av dysor för injicering av absorbent.

Reaktorer är normalt utförda i låglegerat stål.

##### 2.5.3.3.1 Skador i torr eller halvtorr rökgasrening

I reaktorer kan materialet i bottenfickor som är bristfälligt uppvärmda erhålla korrosionsskador. Erosionsskador kan förekomma vid inlopps- och utloppsstudsar för gasen samt på ställen där injicerad absorbent träffar reaktorväggen.

System för hantering av absorbenter är ofta utsatta för erosion och utrustning för släckning av kalciumoxid är utsatt för slitage.

#### 2.5.3.3.2 Provning av torr eller halvtorr rökgasrening

Reaktorerna rengörs och inspekteras visuellt invändigt med tanke på korrosions- och eventuellt erosionsskador. Vid upptäckta skador bestäms godsavverkningen genom att materialets godstjocklek på skadade partier mäts med ultraljudsprovning.

En mätning av reaktorns avskiljningsförmåga bör genomföras för att avgöra om utrustningen har försämrats jämfört med konstruktionsdata.

#### 2.5.3.3.3 Återstående livslängd hos torr eller halvtorr rökgasrening

Om upptäckta skador på materialet är av så stor omfattning att en reparation inte är möjlig bedöms återstående livslängd för reaktorerna genom att skadorna extrapoleras. Återstående livslängd innebär att viss marginal till uppskattat genombrott av materialet finns.

En bedömning bör genomföras av om avskiljningsgraden har försämrats och om den förväntas försämrats ytterligare så gällande eller förväntade framtida miljökrav inte kommer att klaras.

#### 2.5.3.4 Våt rökgasrening

Gasformiga föroreningar kan även avskiljas i en våt rökgasrening. Huvuddelen av stoffet i rökgaserna avskiljs i en föravskiljare till exempel ett elfilter. Därefter sänks rökgastemperaturen genom att vatten sprayas in i rökgasen med dysor placerade i inloppet till den våta avskiljaren, en så kallad quencher. Gasen mätas därmed på vattenånga. Därefter avskiljs de gasformiga föroreningarna i avskiljaren, så kallad skrubber. Skrubbern kan vara utförd med ett eller två steg beroende på de ämnen som skall avskiljas och vara tom eller fylld med fyllkroppar. I övre delen av varje skrubbersteg sprayas vatten in. Vattnet återcirkuleras och kemikalier tillsätts i de cirkulerande vattenströmmarna. Stoff och reaktionsprodukter avskiljs med detta vatten. Vattnet renas och föroreningarna förs till deponi. De renade och på vattenånga mättade gaserna återvärms för att undvika utfällning av droppar i kanaler och i skorstenen samt för att öka plymlyftet. Värmeytorna är ofta belagda med plastmaterial eller keramik för att minska korrosionsrisken.

All utrusning från första vatteninjiceringen i quenchern till kanalen efter återvärmaren utförs i plast eller syrafast material ofta av typ superaustenitiska rostfria stål. Platen skyddas av ett tätt och syratåligt skikt på insidan.

##### 2.5.3.4.1 Skador i våt rökgasrening

Eftersom gasen i den våta reningsanläggningen är mättad på vattenånga föreligger alltid risk för korrosion på ytor med metalliska material. Speciellt återvärmaren är ofta utsatt för korrosionsskador. En skyddande beläggning på återvärmareytan kan ofta skadas eller vatten diffundera genom skiktet.

Skador på tätskiktet på plaster i skrubber eller kanaler kan förekomma och ge upphov till skador på det yttre, bärande plastskiktet.

På vattensidan finns risk för igensättning beroende på utfällning av svårslöslbara salter. Risken för igensättning beror på typ av reningsutrustning.

#### 2.5.3.4.2 Provning av våt rökgasrening

Skrubbern töms på vatten och inspekteras visuellt invändigt med tanke på korrosions- och eventuellt erosionsskador på metalliska material. Vid upptäckta skador bestäms godsavverkningen genom att materialets godstjocklek på skadade partier mäts med ultraljudsprovning. Vid plaster inspekteras ytbeläggningen med tanke på sprickor, buckling och dylikt. Sprickor kan upptäckas med utrustning för gnistindikering.

En mätning av den våta avskiljningsförmågan bör genomföras för att avgöra om utrustningen har försämrats jämfört med konstruktionsdata.

#### 2.5.3.4.3 Återstående livslängd hos våt rökgasrening

Om upptäckta skador på materialet är av så stor omfattning att en reparation inte är möjlig bedöms återstående livslängd för den våta reningen genom att skadorna extrapoleras. Återstående livslängd innebär att det finns tillräcklig marginal till ett uppskattat genombrott av godset fram till nästa inspektion.

En bedömning bör genomföras av om avskiljningsgraden har försämrats och om den förväntas försämrats ytterligare så gällande eller förväntade framtida miljökrav inte kommer att klaras.

#### 2.5.3.5 Katalysatorer

Katalysatorer har installerats i några anläggningar och förekommer dels i pannans bakre del, vid en för katalysatorn lämplig temperatur, och dels efter rökgasrening. I katalysatorn avskiljs kväveoxider eller oreagerad ammoniak från en SNCR-anläggning, så kallad slip.

Vid katalysatorer som är placerade efter rökgasreningen måste rökgaserna återvärmas. Dessa anläggningar är oftast utrustade med värmeväxlare av regenerativ typ för värmeväxling mellan katalysatorns varma och kalla sida. Återvärmningen sker ofta med gas.

Katalysatorn är uppbyggd av ett antal keramiska element med fina kanaler med porös struktur som ger stor kontaktyta mot gasen. Elementen monteras i kassetter i två eller tre lager.

Vid katalysator för avskiljning av kväveoxider tillsätts ammoniak som reaktionsmedel.

Katalysatorelementens aktivitet avtar med tiden och elementen byts eller regenereras efter ett antal år.

Elementen renas med sotblåsare vid anläggningar med hög stofthalt.

##### 2.5.3.5.1 Skador i katalysatorer

Katalysatorelementen kan sättas igen av stoft som gör ytan inaktiv. Igensättningar kan även ge erosionsskador i öppna kanaler.

Kassetter och stödkonstruktioner kan skadas av korrosion om korrosiva ämnen förekommer i gasen.

##### 2.5.3.5.2 Provning av katalysatorer

Katalysatorelementen rengörs och inspekteras visuellt med tanke erosion och beläggningar på ytan. Mätning av katalysatorns avskiljningsförmåga och

ammoniakslip under normal drift utförs. Provelement skickas till leverantören för analys av aktiviteten.

Bärande stålkonstruktioner inspekteras visuellt med tanke på korrosion.

#### 2.5.3.5.3 Återstående livslängd hos katalysatorer

Efter analys av mätdata från testerna med katalysatorn och provelementen kan den återstående livslängden bedömas.

Skador på stålkonstruktioner repareras och påverkar inte bedömningen av katalysatorns livslängd.

#### 2.5.3.6 Värmeåtervinning

Värme i de på fukt mättade rökgaserna efter en våt reningsanläggning kan återvinnas genom att en del av vattenångan i gaserna kondenseras ut. Värmen kan återföras genom direkt kondensering i en värmeväxlare med fjärrvärmevatten av returtemperatur som kylande medium, med värmepumpar av absorption- eller kompressortyp samt genom uppfuktning av förbränningsluft.

Ytorna är oftast utförda i syrafast stål, ofta av typ superaustenitiska rostfria stål, och spolade för att undvika ansamling av salter.

##### 2.5.3.6.1 Skador i system för värmeåtervinning

Vid dessa metoder är speciellt värmeväxlarytor som är gasberörda utsatta för stor korrosionsrisk.

Även system för uppfuktning av förbränningsluft är utsatta för korrosion till exempel kanaler, inlopp i pannan, i fläktar med mera som inte varmhålls tillräckligt.

Vid felaktig utformning av gasinloppet kan även erosionskador förekomma på inloppet till värmeväxlaren.

##### 2.5.3.6.2 Provning av system för värmeåtervinning

Återvärmarna inspekteras visuellt invändigt med tanke på korrosions- och eventuellt erosionsskador. Vid upptäckta skador bestäms godsavverkningen genom att materialets godstjocklek på skadade partier mäts med ultraljudsprovning.

##### 2.5.3.6.3 Återstående livslängd hos system för värmeåtervinning

Om upptäckta skador på materialet är av så stor omfattning att en reparation inte är möjlig bedöms återstående livslängd för värmeväxlarna genom att skadorna extrapoleras. Återstående livslängd innebär att det finns tillräcklig marginal till ett uppskattat genombrott av godset fram till nästa inspektion.

#### 2.5.3.7 Rökgasfläktar

I anläggningar med balanserat drag finns minst en rökgasfläkt eller två parallella rökgasfläktar. I anläggningar med rökgasåterföring finns även rökgasrecirkulationsfläkt.

#### 2.5.3.7.1 Skador i rökgasfläktar

Rökgasfläktar och fläktar för rökgasrecirkulation är ofta utsatta för erosion och korrosion. Speciellt känsliga partier på fläktar är områden kring axelgenomföringar. Spjällblad kan även skadas genom erosion. Dålig isolering av fläkthus och inspektionsluckor kan ge korrosionsskador.

Beläggningar på fläkthjul kan ge upphov till vibrationer.

#### 2.5.3.7.2 Provning av rökgasfläktar

Fläktarna inspekteras visuellt invändigt med tanke på korrosions- och eventuellt erosionsskador. Vid upptäckta skador bestäms godsavverkningen genom att materialets godstjocklek på skadade partier mäts med ultraljudsprovning.

#### 2.5.3.7.3 Återstående livslängd hos rökgasfläktar

Om upptäckta skador på materialet är av så stor omfattning att en reparation inte är möjlig bedöms återstående livslängd för fläktar genom att skadorna extrapoleras. Återstående livslängd innebär att det finns tillräcklig marginal till ett uppskattat genombrott av godset fram till nästa inspektion.

#### 2.5.3.8 Skorstenar

Skorstenar utförs numera med separata pipor för varje panna, ibland med två pipor för en panna. Piporna kan vara fristående eller monterade inuti eller utanpå en betongkonstruktion. I äldre anläggningar förekommer även murade skorstenar där en skorsten utan separata pipor betjänar flera pannor.

Skorstenspiporna utförs i allmänhet av låglegerade så kallade rosttröga stål utom i anläggningar med våt rening där skorstenspiporna även kan vara utförda av rostfria austenitiska stål, duplexstål, plaster (vanligen glasfiber armerad plast, oftast benämnd GAP) eller ytbehandlat låglegerat stål. Ppor utförda i GAP är belagda med ett tätt syrabeständigt skyddsskikt på insidan.

##### 2.5.3.8.1 Skador i skorstenar

Skorstenspipor i stål är ofta utsatta för korrosion på rökassidan om rökstemperaturen är så låg att risk för underskridande av vatten- eller syradagpunkter föreligger. Risken för korrosionsangrepp är speciellt stor vid ytor med dålig isolering och om köldbryggor förekommer.

Vid låglastdrift kan luft även tränga in på skorstenspipans vindsida och medföra stora lokala temperatursänkningar som kan ge korrosionsskador på pipornas översta del. Vid stillestånd kan inträngande regnvatten medföra att pipan korroderar.

Vid murade skorstenar kan fukt från rökgaserna tränga in i murverket och ge upphov till frostsprängning med söndervittring och sprickbildning som följd.

Skorstenspipor i plast eller med invändig beläggning av gummi eller plast kan fatta eld eller smälta om heta gaser vid till exempel bypassdrift leds genom piporna

##### 2.5.3.8.2 Provning av skorstenar

Skorstenspiporna bör inspekteras visuellt med avseende på korrosionsskador i hela sin längd. Speciell uppmärksamhet skall ägnas åt skorstenstoppen och pipans underkant

samt vid inspektionsluckor. Vid upptäckta skador bestäms godsavverkningen genom att materialets godstjocklek på skadade partier mäts med ultraljudsprovning. Pipor i plastmaterial inspekteras med tanke på sprickor eller andra skador på innerytans tätskikt.

Speciellt skall murande skorstenar inspekteras med tanke på sprickor i stenar och murverk.

#### 2.5.3.8.3 Återstående livslängd hos skorstenar

Om upptäckta skador på skorstenspiporna är av så stor omfattning att en reparation inte är möjlig bedöms återstående livslängd för skorstenar genom att skadorna extrapoleras. Återstående livslängd innebär att det finns tillräcklig marginal till ett uppskattat genombrott av godset fram till nästa inspektion.

Den återstående livslängden för murade skorstenar bedöms till den tidpunkt då den kapitaliserade årliga underhållskostnaden för reparationer överstiger kostnaden för en ny skorsten.

#### 2.5.4 Askhanteringssystem

De icke brännbara föroreningar i bränslet som faller ut i eldstaden eller från rosten bortförs i form av bottenaska (eller slagg) från eldstadens botten. Det lättare stoft av obrännbara partiklar från bränslet, fina sandpartiklar och sot som följer med rökgaserna avskiljs vid omlänkningar i gasstråket och i stoftavskiljare och bortförs som flygaska. Mängden flygaska ökar tillfälligt vid sotning av panntuber under drift.

Hanteringssystemen för bottenaska och flygaska utformas efter bränsle samt typ av panna och rökgasrening och finns i ett stort antal varianter.

Vid eldning med gas och lätta eldningsolja bildas ingen bottenaska och nästan ingen flygaska varför askhanteringssystem ibland saknas helt. Vid eldning med pulver med låg askhalt blir mängden bottenaska så liten att bottenasksystem ibland saknas.

##### 2.5.4.1 Bottenaska

Bottenaska matas ut från eldstadens botten eller slutet på en rost genom ett eller flera fallschakt eller ibland med en skruv eller skrapa till en askutmatare. För att förhindra luftläckage genom fallschakten är dessa försedda med antingen vattenlås, slussar, spjäll eller står fyllda med aska. Oftast kylv sedan bottenaskan i ett vattenbad, så kallad slaggläckare, som då även utgör vattenlås. I vissa fall sker kylningen i vattenkylda transportörer. I en del slaggläckare kompakteras det utmatade materialet för att minimera medföljande vattenmängd.

Från askutmataren förs sedan bottenaskan till en silo, öppet lager eller en container med en transportör till exempel skrapor, lamelltransportörer, gummiband, vibrationsrännor, skoptransportörer, skruvar. Transportörerna är oftast täckta för att förhindra att vattenånga avgår till pannhuset. Bottenaskan förs bort från anläggningen med bilar som lastas med travers, skopa eller lastmaskiner.

Genomfall av aska från en rost förs oftast till slaggläckaren med hjälp av skruvar, skrapor eller pneumatik.



Utmatningsutrustning, till exempel skruvar, som är placerad i eldstaden är oftast vattenkyld och ofta täckt med bottenaska. Denna kan utsättas för strålning från eldstaden.

Pannor med fluidiserad förbränning kan vara utrustade med en sikt. De finaste partiklarna återförs till bädden och minskar sandförbrukningen.

I transportörer är delar som utsätts för slitage ofta utförda i höghållfasta slitstål som vanligen påläggsvetsas vid renovering.

#### 2.5.4.1.1 Skador i system för bottenaska

All utrustning som hanterar bottenaska är utsatt för hårt slitage och kräver stort underhåll. I skrapor slits glidytor, kättingar, medbringare och axelgenomföringar. Skruvar slits på skruvgångornas transportsida och på gängans periferi samt i axelgenomföringar och på lager som monterats i materialströmmen. I vibrationsrännor slits fjädrar och drivutrustning. Gummiband kan slitas på sidorna, skäras sönder om vassa partiklar förekommer i bottenaskan eller repas. Om hett material matas ut på gummiband vid fel på slaggekylningen kan hål eller gropar uppstå i banden. Vid hantering med kran slits framförallt linor. Pneumatisk transport ger erosionsskador i rörböjar eller vid dimensionsändringar i rören. Utrustning som ligger i vattenbad är utsatt för både slitage och korrosion.

Trattar i underkant på eldstaden som kyla med rinnande vatten är ofta utsatta för skador på grund av sprickor som orsakas av termiska spänningar vid tillfällena då spolning av vissa ytor tillfälligt kan upphöra eller om vattendroppar träffar heta stålytor.

#### 2.5.4.1.2 Provning av system för bottenaska

Utrustning för bottenaska töms och inspekteras visuellt invändigt med tanke på korrosions- och erosionsskador. Vid upptäckta skador bestäms godsavverkningen genom att materialets godstjocklek på skadade partier mäts med ultraljudsprovning.

Sprickor kontrolleras med penetrant- eller magnetpulverprovning.

#### 2.5.4.1.3 Återstående livslängd hos system för bottenaska

Om upptäckta skador på materialet är av så stor omfattning att en reparation inte är möjlig bedöms återstående livslängd för utrustningen genom att skadorna extrapoleras. Återstående livslängd innebär att viss marginal till uppskattat genombrott av materialet finns.

#### 2.5.4.2 Flygaska

Flygaska avskiljs från rökgaserna i stoftavskiljare efter pannan. I anläggningar där gaserna även renas från sura komponenter i torr eller halvtorr reningsanläggning avskiljs flygaskan tillsammans med reaktionsprodukter och oreagerad absorbent. Den avskilda produkten kallas då ofta restprodukt från rökgasrening. En mindre mängd flygaska avskiljs även genom pannans bottenfickor vid överhettare, förångarytor och ekonomisar. Flygaskan mellanlagras i torrt tillstånd i flygaskilos.

Från flygaskilon förs askan sedan till deponi antingen torrt med bulkbilar eller befuktat med täckta lastbilar. I vissa fall, speciellt vid avfallsförbränning, stabiliseras

flygaskan med till exempel cement för att minska risken för urlakning av bland annat tungmetaller på deponin.

Flygaskan matas ut ur stoftavskiljaren med slussmatare eller spjäll och transporteras till asksilon med skruvar, skrapor, pneumatiska rännor eller pneumatiska sändare. Sådana transportörer förekommer ofta även i stoftavskiljarens fickor. För att undvika damning är alla transportörer täckta.

Silon består av en vertikal silo med stoftavskiljare på toppen. I stoftavskiljaren renas den luft som följer med flygaskan vid transport till silon samt luft som undanträngs från bulkbilar vid lossning. Silon är ofta försedd med explosionsluckor på mantelns översida eller på silotaket. I underkant matas askan ut med någon form av utmatare, till exempel stokers, glidramar, skruvar via skruvar eller skrapor till antingen en torr utmatningsanordning för bulkbil eller till en befuktare för öppna lastbilar. Underdelen av silon är ofta uppvärmd för att minska risken för utfällning av fukt.

I befuktaren blandas flygaskan med vatten så att en fuktig krambar produkt bildas. Befuktningen kan ske i det löpande flödet eller i satser. Befuktaren består av en eller flera skruvar eller en eller flera rotoror med paddlar eller plogar där vattnet tillsätts i en eller flera dysor.

#### 2.5.4.2.1 Skador i system för flygaska

Vanliga skador på transportsystemen är erosion i rör och sändare vid pneumatiska system samt igensättning och korrosion om fukt kan tränga in i askan. I dåligt isolerade, ej tillräckligt värmda eller obehandlade asksilos kan korrosionsskador uppträda på mantelns eller bottenens insida. Befuktare är utsatta för skador orsakade av korrosion och erosion på hus, paddlar, plogar och dysor. Explosionsluckor på silos och transportörer kan vara funktionsodugliga på grund av stoftbeläggningar eller mekaniska skador.

Vid hög halt oförbränt i flygaskan kan bränder uppstå i lagersilos och utmatningssystem från stoftavskiljarnas fickor med deformation av utrustning i stål.

#### 2.5.4.2.2 Provning av system för flygaska

Silos och övrig utrustning för flygaska töms och inspekteras visuellt invändigt med tanke på korrosions- och erosionsskador. Vid upptäckta skador bestäms godsavverkningen genom att materialets godstjocklek på skadade partier mäts med ultraljudsprovning.

Sprickor kontrolleras med penetrant- eller magnetpulverprovning.

#### 2.5.4.2.3 Återstående livslängd hos system för flygaska

Om upptäckta skador på materialet är av så stor omfattning att en reparation inte är möjlig bedöms återstående livslängd för utrustningen genom att skadorna extrapoleras. Återstående livslängd innebär att det finns tillräcklig marginal till ett uppskattat genombrott av godset fram till nästa inspektion.

### 2.5.5 Värmepumpar

#### Omfattning och användning

För fjärrvärmeproduktion i Sverige med värmepumpar utgörs den klart dominerande delen av kompressordrivna aggregat. Ett fåtal absorptionsvärmepumpar har installerats i samband med rökgaskondensering. De kompressordrivna finns i ett brett storleksområde; 100kW- 50MW som levererad effekt. Beroende på storlek används olika kompressortyper, men den dominerande är turbokompressorn, som därför kommer att behandlas här. I de anläggningar, som utförts med kolv- respektive skruvkompressorer, är dessa nästan alltid utförda som kylaggregat och har endast en annan applikation som värmepumpar. Detta är också ett skäl till att inte här behandla den tekniken.

Statistik från 1997 ger en översikt på användningen:

**Tabell 2.5-5 Omfattning av olika värmepumpar för fjärrvärmeproduktion**

| Kompressortyp | Värmeeffekt | Årsenergi för samtliga, GWh |
|---------------|-------------|-----------------------------|
| kolv          | 100-250 kW  | 25                          |
| skruv         | 150-5000 kW | 310                         |
| turbo         | 2-50 MW     | 7300                        |

Värmekällan utgörs vanligtvis av renat avloppsvatten. Andra värmekällor är sjövattnet, industriell spillvärme, fjärrkyla, grundvatten, geotermi, uteluft, jord-/bergvärme samt bottensediment.

Alla här behandlade kompressordrivna värmepumpar drivs med elmotorer.

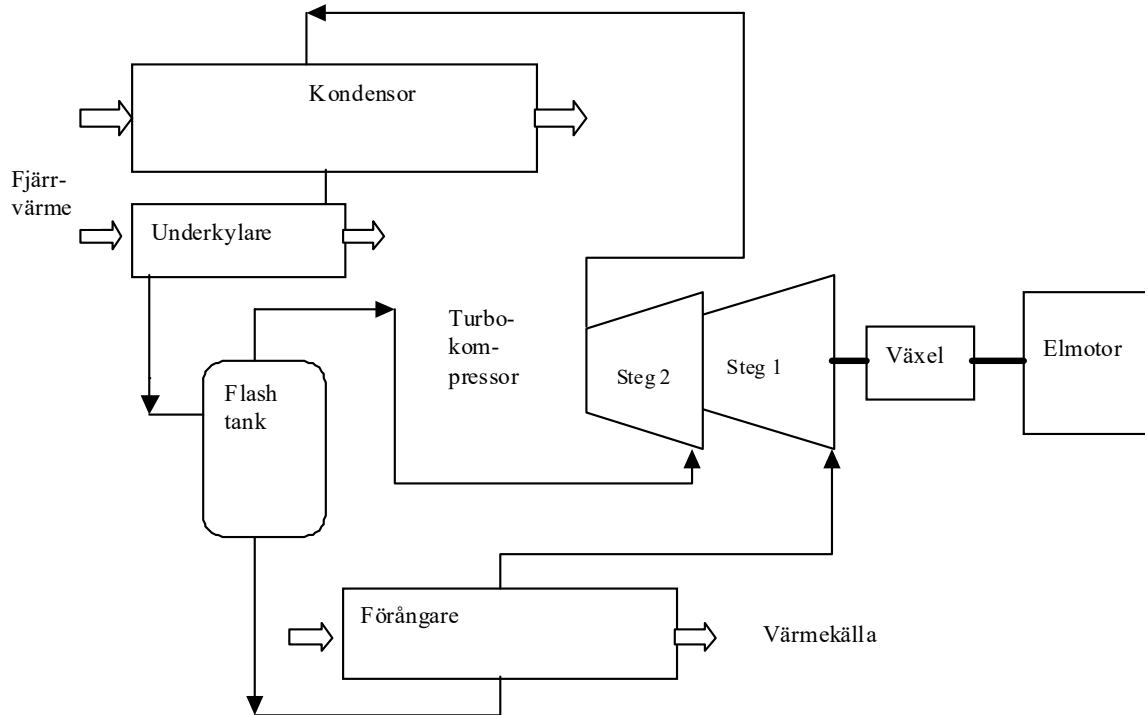
I vissa fall används värmepumparna även för produktion av fjärrkyla.

Köldmedia utgörs (ev med något enstaka undantag) av konstgjorda media.

Ursprungligen dominerade CFC (klor-fluor-kol-förening) men efter förbudet mot påfyllning år 1998 och användning från år 2000 har allt ersatts med HFC 134a (en väte-fluor-kol-förening). Även HCFC 22 (en väte-klor-fluor-kol-förening) har ersatts med HFC134a.

De flesta värmepumpar i landet togs i drift i mitten på 80-talet.

De större värmepumparna är typiskt dimensionerade för en livslängd på 20-25 år. Den verkliga livslängden är osäker och beror mycket på körsätt och aktuell miljö.

Grundläggande processbeskrivning**Figur 2. 5-10** Processbild med huvudkomponenter**Figure 2. 5-10** Process scheme with main components

Figur 2. 5-10 visar en värmepump med en tvåstegskompressor, vilket är det vanligaste utförandet och typiskt för effekter i storleksordningen 10-30 MWv. Mindre värmepumpar kan ha enstegskompressor och större kan ha kompressorer med tre steg. Med begreppet "värmepump" avses här köldmediekretsen inklusive drivanordning och oljesystem. Yttre system såsom fjärrvärme, värmekälla, elkraft och styrning tas inte upp här.

Båda kompressorstegen drivs här på samma axel, men växeln kan också ha flera utgående axlar (som vid trestegskompressor). För små enstegsanläggningar kan en planetväxel vara integrerad i köldmediekretsen.

Kondensorer och underkylare är utförda som tubvärmeväxlare med fjärrvärmevatten på insidan tuberna. Tubmaterialet är oftast av kolstål.

I figuren visas en tubförångare, men även öppna strilförångare är vanligt förekommande. Tubförångare är nästan helt fyllda med köldmedium. Vatten går på insidan av tuberna för att enklare kunna rengöra dessa. Tuber utförs i något korrosionsresistent material; kopparlegering eller något rostfritt stål. Strilförångarna består av vertikala plattor där vatten strilar på utsidan och köldmediet under förångning stiger på insidan. Förångaren utförs här i något mer eller mindre legerat rostfritt stål. Till strilförångaren hör även en vätskeavskiljare.

**Elmotorer** finns både som asynkrona och synkrona. Mindre motorer, upptill ca 8MW, är typiskt utförda som asynkronmotorer. Motorerna är normalt vattenkylda där värmen upptas i köldmediekretsen.

**Oljesystem** visas inte i figuren, men utgörs av tätoljesystem för kompressorns axeltätningar och smörjsystem för lager i kompressor, växel (hjul och lager) samt ofta motorns lager (fettsmorda rullager förekommer också). Systemen kan vara mer eller mindre gemensamma. Värme från oljesystemet tillförs normalt i köldmediesystemet via oljekylare och ett mellanliggande kylvattensystem.

#### 2.5.5.1 Skador i värmepumpar

I detta avsnitt berörs skador på komponent- eller systemnivå, som har betydelse för bedömning av livslängd, eller bedöms vara så omfattande att de har stor inverkan på underhållskostnader och tillgänglighet.

Ibland rekommenderas åtgärder för att undvika nämnda skador, men i huvudsak hänvisas till underkapitel **2.5.5.2 Provning av värmepumpar**.

#### Kompressor

Kompressorhjul är utsatta för utmattningsbelastningar och har således en begränsad livslängd, som kan vara kortare än hela anläggningens. Största faran med ett sådant haveri är att lösa delar kan orsaka skador i kondensorn. Kompressorhjulen kan också skadas vid montage/demontage genom påkrympning på axeln och antalet sådana tillfällen sätter en gräns för livslängden. Kompressorhjul har också skadats av köldmedievätska i inloppet, antingen av medryckande droppar eller vätska i inloppet vid start.

Axeltätningarna är ett stort problem vad gäller skador/begränsad livslängd. Orsaken är främst kraven på låga köldmedieläckage. Det är inte ovanligt att tätningar måste bytas tätare än revisionsintervallen. Orsaken till problemen är främst att mekaniska axeltätningar på stora maskiner har höga periferihastigheter och kan sägas ligga på gränsen för vad som idag är tekniskt möjligt. En bidragande orsak är oljekvaliteten (mer om detta senare). Teknikutveckling har dock förbättrat tätningarna exempelvis genom förbättrad kylning och nya tätningsmaterial. Antalet starter och stopp påverkar livslängden, speciellt gäller det "oplanerade stopp" (trippar) orsakat bl.a. av kraftstörning (åska t ex) eller av snabba tryckförändringar på fjärrvärmenätet.

Rotoraxlar kan förslitas vid montage/demontage och får därmed en begränsad livslängd.

Ledskeneregleringen är utsatt för slitage i motorer, bussningar, länkar, mm. Själva styrmekaniken har ofta krånglat. Ledskenorna kan vara utsatta för vibrationer som ger utmattning. Beroende på körsätt kan ledskeneregleringen sätta en gräns för revisionsintervall.

Kompressorhus kan vara utsatta för erosion och syraangrepp. Det senare beror på dålig kvalitet på köldmediet och kan motverkas t ex med fuktfilter. Skruvförband utsätts för förslitning, men lagning är möjlig varför detta inte är allvarligt.

Labyrinttätningar kan behöva bytas ut beroende på om de är slitna och ger för mycket flöde. Minst lika allvarligt är om tätningen har blivit skadad på så sätt att den ej släpper igenom erforderligt flöde. För höga temperaturer kan då uppstå på köldmediet.

Temperaturen på köldmediet kan då bli så hög att nedbrytning av köldmediet sker med allvarliga följdskador som konsekvens.

Diffusorringar finns i vissa typer av stora kompressorer. I några anläggningar har dessa utmattats.

#### *Kondensor och underkylare*

Nedan redovisas olika typer av skador som uppstått:

- Pulsationer och höga gashastigheter från kompressorn har lett till skador i prallstänger som i vissa anläggningar skyddar tuber på hetgassidan vid inloppet från kompressorn. Följden har i ett flertal fall blivit sprickor i infästningar som i flera fall fått till följd att prallstänger kommit i kontakt med tuber och skadat dessa så att det i några fall blivit läckage. Normalt har skadorna upptäckts i ett tidigt stadium. Då har inget läckage uppstått. Det visar vikten av att utföra inspektioner.
- Tuber kan vara utsatta för korrosion från vattensidan om vattenkvaliteten inte håller fjärrvärmestandard. Speciellt är detta fallet om kondensorn görs trycklös vid stillestånd genom att öppna ventil mot atmosfären. Kraftiga magnetitavlagringar kan vidare ge upphov till lokala korrosionsangrepp, gropfrätning, i tuber. Speciellt utgör stilleståndskorrosion i tuber en risk då kondensorn dräneras, men inte fullständigt torkas.
- Tuberna är framförallt känsliga för vibrationer som kan leda till godsfortunning genom deformation vid uppstagningarna. Tuber bör inte vara ytförstorade här. Denna typ av skada bedöms vara den allvarligaste för dessa värmeväxlare. Vibrationer har även lett till sprickbildning vid uppstagningar. Det är fullt realistiskt att räkna med att ett tubbyte måste ske under anläggningens livslängd.
- Som tidigare nämnts finns risk för att lösa delar t ex från kompressorn kan slå sönder eller nöta på tuber. Det har även hänt att plåtar lossnat inne i kondensor/underkylare och skadat tuber.
- Tubernas infästningar kan i vissa fall vara en potentiell källa till läckage. Sådana problem kan leda till att tuberna kan behöva pluggas. Antalet tuber har dock marginal och bedöms inte vara avgörande för livslängden på kondensorn.
- Tömning av köldmedium utan att vattensidan dränerats kan leda till sönderfrysning av underkylartuber.

#### *Tubförångare*

Skadorna är av liknande karaktär som i kondensorer, men korrosionsproblemen är större. Bland de skador av allvarlig karaktär som uppstått kan nämnas:

- Uttunning av tuber vid stödplåtar orsakat av vibrationer. Antingen pluggar man tuberna, men om det handlar om för många måste ett tubbyte ske. Tuberna ska vara släta vid dessa stödplåtar.
- Tubplattan är vanligtvis utförd av vanligt kolstål. Denna måste naturligtvis vara korrosionsskyddad på vattensidan, men speciellt vid tubinfästningen finns det ändå risk för korrosion. Mjuk ytbehandling rekommenderas för att minska risk för sprickor. En annan metod är att belägga tubplattan med en tunn skyddsplåt i korrosionssäkert material. Offeranoder kan vara ett bra skydd.
- Korrosion och erosion i tuber. De korrosionstyper som är mest aktuella är gropfrätning och spaltkorrosion. Erosionsrisken finns för kopparmaterial och inträffar nära tubinloppet. Korrosion kan också inträffa under stillestånd om tuber ej dräneras fullständigt och torkas.

- Förångartuber har skadats av vätskeströmning från olämpligt placerade påstick. Ombyggnad rekommenderas i sådana fall.
- Sönderfrysning av tuber då man tömmer anläggningen på köldmedium med stillastående vatten i tuberna.

#### *Strilförångare*

Utan tvekan är strilförångare mindre utsatta för skador än vad som gäller för tubförångare. Det beror både på att de oftast är tillverkade i korrosions- och erosionsbeständigare material och att vattenhastigheterna är lägre.

Såvitt känt har ännu inga "åldringstendenser" upptäckts i strilförångare. Å andra sidan har veterligen inga ordentliga materialundersökningar heller utförts. Stora skador är sällsynta. Här listas några enstaka fall samt vad som kan utgöra risker:

- Vibrationer i plattor kan ge utmattning. Om detta upptäcks bör plåtarna stagas upp.
- Höga viktbelastningar som följd av ispåväxt.
- Svetsarna har högst risk för korrosion.
- Sprut från slipverktyg eller svets får ej träffa ytorna eftersom korrosion kan bli följden.
- Lågcykelutmattning från köldmediesidan kan eventuellt utgöra en risk.

#### *Köldmediesystemet i övrigt*

Övriga delar i köldmediesystemet utgörs främst av rörsystemet och tillhörande komponenter som ventiler mm. Av betydelse för anläggningens livslängd tas endast rörsystemet upp här eftersom andra komponenter enklare kan bytas ut.

Det handlar om främst två fenomen: utmattning från vibrationer och korrosion från in- eller utsida.

- Skadliga vibrationer har uppstått på omlänkningar och enskilda rör. Omkonstruktion och uppstagning blir motåtgärden.
- Korrosion från köldmediesidan inträffar om syra bildas genom sönderdelning av köldmedium, vilket kan ske bl a vid för höga fukthalter. Torkfilter ska alltid användas. Vidare är det lämpligt med syrafast stål i utsatta delar som impulsrör där stillastående köldmedium kan ansamlas.
- Korrosion från utsidan beror på dålig kondensisolering, felaktigt materialval (t.ex. vanligt kolstål i strilförångarrum) eller dålig ytbehandling.
- Det finns något enstaka exempel på erosionsskada i rörsystem speciellt vid fickor och liknande.

#### *Oljesystem*

Som tidigare nämnts finns ofta ett gemensamt system för kompressor, växel och motor.

Den kompromiss i oljeval som blivit följden har misstänkts vara en orsak till problem med axeltätningars livslängd, som i många fall varit kortare än revisionsintervallen. Växeln ställer speciella krav på oljan och det har bl a varit styrande både vad gäller oljetyp och val av additiv. Additiven har misstänkts bidra till beläggningar på axeltätningar.

För att få mer anpassade oljor till respektive objekt vore det bättre med separata oljesystem för motor, växel och kompressor. Risken för kontaminering mellan



systemen undviks genom helt separata system. Sådana kompletteringar kan övervägas för befintliga anläggningar.

#### *Kompressormotorer*

Elmotorer för värmepumparna har typiskt varit utförda för högspänning, normalt 10-11 kV. Enbart den motortypen behandlas här.

Generellt kan det sägas att motorerna belastas hårt vid start (speciellt de största motorerna som ofta har direktstart) och sedan går de kontrollerade på effekt eller ström mycket nära maxeffekten. Motorerna är inte lämpliga för frekventa starter på grund av mekaniska och termiska belastningar vid start.

Isoleringen i rotorlindningar avgör vanligtvis livslängden av kompressormotorerna.

#### Asynkronmotorer

För effekter upp till 8 MW har man valt asynkronmotorer. Man har typiskt valt släpringade motorer för reducerad startström som då även ger mjukare start och reducerar mekaniska belastningar på motor, axlar, kopplingar. Motorerna är oftast vattenkylda.

Exempel på skador och erfarenheter:

- Lagerhaveri har inträffat pga sänkt blyhalt i smörjolja (leverantören har bytt kvalitet utan att meddela detta).
- Olika problem med borstlyftningsanordning.
- Både rotor- och statorlindningshaverier har inträffat. Ett flertal motorer har haft felaktigt isolermaterial i lindningarna, vilket lett till för snabb åldring. Dessa motorer är nu utbytta eller omlindade med nytt material.
- Vidare har metoden med vakuumtryckimpregnering (VPI-teknik) av lindningar verkat ha gett bättre resultat jämfört med tidigare motorer.
- En erfarenhet är att man bör undvika kontinuerligt anliggande borstar.

#### Synkronmotorer

Dessa motorer har en märkeffekt på i storleksordningen 10 MW. De startas direkt mot nät, vilket således kräver ett starkt elnät. Motiv för att välja dessa motorer är främst att de kan producera reaktiv effekt och att man undviker rotorpådrag och släpringar och därmed får enklare underhåll. Belastningarna vid start är mycket stora och temperaturstegringen i lindningar likaså. Starttemperaturer upp till 300°C har nämnts, i rotorytan upp till 500°C. Dessa motorer är i ännu högre grad anpassade för få starter.

Denna storlek av motorer kräver stabil stomme för att minska vridningar vid start. Sådana deformationer i kombination med mycket höga starttemperaturer utsätter lindningar för stora påfrestningar. Problemet med lindningarna är isoleringen som skadas.

Dessa synkronmaskiner används ofta även som generatorer.

Exempel på skador:

- Halvledare (tyristorer och dioder) går sönder. En leverantör rekommenderar att byta samtliga då någon är trasig.
- Spolstöd i rotor rör sig utåt.
- Lossnad isolering i rotorlindning pga skadat/åldrat lim.

- Skada i kilspår i rotor orsakat av frekventa starter.
- Beläggningar (beckning) i motorlager.
- Statorskada orsakat av överslag.
- Oljeringar (för utrullning vid elbortfall) i motorlager slits, deformerar lagerhus och genererar partiklar som sliter på lager. Lösningen har varit att sätta in en teflonring.

#### *Växlar*

Alla turbokompressordrivna värmepumpar i denna applikation kräver varvtal som medfört behov av en växel.

De kritiska delarna är själva kuggarna som kan nötas eller utsättas för utmattnings.

För växlarnas funktion är det avgörande att ha rätt oljetyp och kvalitet. Dessutom är fukt är en viktig parameter. I de anläggningar där man har ett gemensamt oljesystem har bl a växeln varit styrande för val av olja. Detta berörs mera under "oljesystem".

Även för växlarna är antalet starter en viktig faktor.

Erfarenheterna hittills är i stort sett goda. Ett fåtal skador kan nämnas:

- Kuggdefekt orsakat av dålig uppriktning.
- Underdimensionerad växel som orsakat brott i kuggar

#### *Kopplingar*

I Figur 2. 5-10 visas inte några axelkopplingar men de tas upp här då vissa konstruktioner gett skador som begränsat livslängden.

- Gummielement för dämpning har åldrats och bedöms behöva bytas vart femte år.
- Kuggkoppling har haft slitmärken som berott på byte till ny blyfri olja. Lösningen blev att byta till annan oljekvalitet.

#### *2.5.5.2 Provnings av värmepumpar*

Förslag till provningar följer i stort sett komponenter enligt föregående avsnitt.

Det bör observeras att rekommendationer ej är anläggningsspecifika och ej kan ersätta gällande drift- och underhållsinstruktioner. Skulle motstridighet mot leverantörens anvisningar uppstå måste en dialog föras med denne om lämpligheten i åtgärden. De provningar som rekommenderas är huvudsakligen utöver normala revisioner.

#### *Värmepumpprocessen*

För att utröna om anläggningen går optimalt kan det vara lämpligt att genomföra ett test av processen avseende verkningsgrader, utläggning etc. VP-leverantörer har ibland tagit fram program för sådan uppföljning.

Driftövervakningsinstrument som t ex vibrationsmätningar ger värdefull information. Det är då av stor betydelse att tydligt sammanställa historiska data i trendkurvor.

#### *Kompressorer*

Genom återkommande revisioner fås en bra grundkontroll av kompressorn. Här tas endast vissa delar av revisionsåtgärder upp:

- Kompressorhjul samt ledskenor kan testas med penetrantprovning för att utröna om det finns begynnande sprickor.
- Kontroll av erosion/korrosion på axlar och husdelar.
- Kontrollmätning av spel, toleranser.
- Analyser av labyrintätningar.
- Om diffusorringar gått sönder bör en analys om orsak, inverkan av delaster samt störningsfrekvenser från impellerblad då ske. Eventuellt bör en ändring av konstruktionen eller körsätt (närhet till pumpning) ändra på den framtida driften. Detta bör diskuteras och analyseras främst med leverantören men även utomstående expert som har alla erforderliga kunskaper kan involveras.

Om kompressorn skickas på verkstad kan heliumläcktestning (se även [avsnitt 1.6.11](#)) av kompressorhuset övervägas.

Vid begränsade (mindre) revisioner gör man lämpligen inspektion med endoscop.

#### *Kondensor och underkylare*

För att bedöma skador på tuber, t ex från stödplåtar eller korrosion, rekommenderas EC-provning (Eddy Current/virvelström), helst i kombination med uttag av enstaka tub. Den senare metoden är ett viktigt komplement till EC-provning för att kunna verifiera resultatet och kunna säkerställa en eventuell skada. Den ger möjlighet till okulär besiktning samt metallografisk undersökning på laboratorium. Man kan också ha en "dummy"-tub att kalibrera på. Det bör poängteras för utföraren att man letar efter både invändiga och utvändiga skador.

Kraftiga magnetitavlagringar kan leda till lokala korrosionsangrepp. Ett sätt att övervaka avlagringar med oförstörande provning är att mäta den försämrade värmeöverföringen. Detta görs genom att avsätta " $\Delta T$ , min" (temperaturskillnaden mellan kondensering och utgående vatten) mot överförd effekt. Det ska bli ett linjärt samband (då vattenflödena är konstanta). En sådan driftövervakning ger ett tydligt besked om förändringar som kan bero på avlagringar på vattensidan. Fiberoptik kan ibland användas, speciellt om man har en känd skada som ska kontrolleras. Metoden kan ses som ett komplement till andra metoder.

Tubernas infästningar bör läcktestas årligen.

Prallstängers status bör kontrolleras enligt leverantörens instruktioner. Uppföljning av redan modifierade kondensorer bör genomföras för att på sikt undvika överraskningar. Denna uppföljning bör läggas in som en naturlig del i det normala underhållet. Lämpligen förs en dialog med leverantören i frågan.

#### *Tubförångare*

I stort sett är det samma åtgärder som gäller som för kondensorn.

Visuell inspektion vid tubinlopp kan visa begynnande erosion. Tubplåtar och vattenkamrar bör inspekteras okulärt varje år.

Vattenkvaliteten bör analyseras fortlöpande främst avseende risken för korrosion.

#### *Strilförångare*

Inga regelbundna provningsmetoder föreslås. Efter lång tids drift, 10-15 år, rekommenderas radiografisk provning och virvelströmsmätning via stickprovsuttag av svetsar, främst för att indikera eventuell sprickbildning, korrosion eller beläggningar. Om

det finns tendenser till brister kan ett förstörande prov på en panel övervägas. Här kan metallografisk undersökning samt hållfasthetstest av punktsvetsar ingå.

#### *Köldmediesystemet*

Regelbundna prover på köldmediet tagna i samma punkt och i vätskefas bör göras åtminstone årligen. Viktiga parametrar är fukt- och oljehalt och nedbrytningsprodukter.

#### *Oljesystemet*

Regelbundna (minst årligen) prover tas på oljan. Viktiga parametrar är syratalt, fukthalt, koppar- och järnhalter.

#### *Gemensamt kompressormotor-kompressorväxel*

Vibrationsnivåer uppmäts och utvärderas för att utröna obalanser, felaktiga uppriktningar mm. I varje mätpunkt görs treaxliga mätningar.

Mätning och utvärdering av lagertemperaturer genomförs.

Uppriktningen av hela systemet kontrolleras.

#### *Kompressormotor*

Lindningars isolerförmåga i rotor och stator testas normalt med resistansmätning ("meggning").

En relativt ny oförstörande metod för att testa isoleringsförmågan i lindningarna är genom att skicka en kort, energisvag puls på ca 30 kV (för dessa 10kV-motorer) genom lindningarna och studera hur denna förändras. En dålig isolering ger ett visst överslag och ändrar pulsens utseende vid utgången utan att skada lindningarna.

En större översyn (än vanlig revision) är kan ske typiskt efter i storleksordningen 10 à 15 års drift. En sådan översyn inkluderar utdragning av rotor. Omfattning av en större översyn är beroende av utfall vid tidigare, enklare inspektioner.

Oljekvaliteten kontrolleras främst med avseende partiklar och ev närvaro av köldmedium eller dess nedbrytningsprodukter. Köldmedium får inte finnas i oljan.

Vibrationsövervakningen kan ge besked om t ex lindningar som håller på att lossa.

#### *Växel*

Avgörande för växels funktion är korrekt uppriktning och rätt oljekvalitet. Kuggarnas ingreppsbild kontrolleras med färgmärkning av kuggbanor efter varje revision. En efterkontroll rekommenderas efter en veckas drift.

Rekommendationer från olika leverantörer skiljer självklart, men vissa rekommenderar inspektion av lager och kuggytor efter ca 10 års drift. Fukthalten i oljan bör fortlöpande kontrolleras.

#### *2.5.5.3 Återstående livslängd hos värmepumpar*

I likhet med andra komponenter och system spelar driftsätt, underhåll och andra lokala förutsättningar stor roll för livslängd på en värmepumpinstallation. För att uppskatta återstående livslängd bör man ha flera utförliga mätningar och framförallt måste det finnas ett lämpligt tidsintervall mellan mätningarna.

Även enstaka mätningar kan ibland användas för att dra slutsatser om livslängd om avvikelser från data för nyanläggning är väsentlig.

Analys av inträffade skador ska också användas, dels för att dra slutsatser om aktuella eller andra liknande komponenter och dels för att bedöma erforderligt åtgärdsbehov för att undvika skador eller haverier.

#### *Kompressor*

Man bör räkna med att byta ett flertal ingående komponenter under anläggningens livslängd. Så är fallet med kompressorchjul, rotoraxel, ledskenor och labyrinttätningar.

Dock är det realistiskt att räkna med att kompressorhuset kan behållas hela tiden.

#### *Kondensor och underkylare*

Det är i huvudsak skador vid tubstagningar samt punktkorrosion som begränsar livslängden. Efter en första inspektion på utdragen tub efter ca 10 år görs en uppskattning av den återstående livslängden. Livslängdsbedömningen grundar sig på uppmätt hastigheten i nötning respektive djup av korrosionsangrepp. Ett vanligt förfarande är att vänta 5 år till nästa inspektion om skadorna är ringa. Är skadorna påtagliga tubar man om helt eller delvis.

#### *Förångare*

Förfarandet för livslängdsbedömning av tubförångare är som för kondensorn.

Strölförångare bedöms med dagens kunskap ha en livslängd som inte utgör en begränsning i användningen. Eventuella svetsreparationer måste utföras på ett fackmannamässigt sätt för att undvika korrosionsangrepp.

#### *Kompressormotor*

Dessa motorer har en livslängd som varierar kraftigt beroende på utförande och körsätt.

Följande beskrivning är främst relevant för de största motorerna.

Rotorns lindning ses som den svagaste delen pga höga mekaniska och termiska belastningar samt frånvaro av möjlighet till temperaturmätning. Lindningens livslängd kan vara betydligt kortare än den som typiskt förväntas på motorn som helhet.

För just isolerfel i rotor kan man beskriva orsakerna som beroende av ett flertal samverkande faktorer:

- Termiska; upprepade starter, lång startid, hög effekt, dålig kylning
- Elektriska; övertoner, transienter, fasobalanser
- Miljö; förorenad luft, fuktig luft, ozon
- Mekaniska; vibrationer, kortslutning på nätet, ofrivilliga trippar

Som tidigare nämnts är det främst antal starter och drifttemperatur som avgör livslängden. Belastningar vid start har av en leverantör likställts med 20 timmars drift. För att förlänga livslängden kan drifttemperaturen behöva sänkas. Det är lindningarnas isolering som åldras och en uppskattning som nämnts är att en höjning av drifttemperaturen med 10°C betyder så mycket som en halvering i förväntad livslängd. Om man vill köra anläggningen längre, upp mot 25-30 år, rekommenderas en dialog med leverantören för att ta ställning till eventuellt ändrat driftsätt. Det kan dock visa

sig bli lönsamt att höja effekten och kalkylera med byte av hela motorn eller uppgradering. Det är realistiskt att räkna med något högre verkningsgrad på nya motorer.

Vid byte av rotor kan det vara vits att uppgradera till högre isolerklass.

Andra komponenter med begränsad livslängd är likriktardel och motorlager.

Många synkronmotorer har omodern MVar -reglering.

#### *Växel*

En inspektion efter 10-15 år kan ge underlag för att bedöma livslängden. Detta bygger dock på liknande framtida förhållanden och dessa bestäms främst av uppriktning och oljekvalitet. Liksom för motorn är antal starter av betydelse.

### 2.5.6 Vattenkylare

Funktionen av vattenkylare går ut på att växla värme mellan vatten med olika temperaturer utan blandning. Vattenkvaliteten kan då bibehållas vilket vanligen är nödvändigt vid värmeväxling mellan olika vattenkvaliteter, t ex ett processvatten och sjövattnet.

Vattenkylare är en typ av värmeväxlare, som förmedlar utbyte av värme mellan två vattenmedier. Oftast finns det ett flertal skiljeväggar mellan de båda medierna, som överför värmen, samtidigt som båda medierna som skall byta värme är i rörelse.

I regel eftersträvas ett snabbt utbyte av värme, varför konstruktionen bör vara så funktionsduglig som möjligt för att inte tid skall förloras vid materialets temperaturförändring. Vattenkylare kan vara vertikala eller horisontella. Vid utformning måste även hänsyn tas till temperatur och tryck på ömse sidan om värmeytan.

#### *Konstruktion*

Vanligtvis består en vattenkylare av en tubvärmeväxlare, där värmeytan utgörs av ett antal parallella rör eller tuber infästade genom invalsning i plana tubgavlar. Tubsatsen omges av en mantel samt av kupade lock. Det ena mediet strömmar genom tuberna och det andra mediet mellan tuberna, tubgavlarna och mantelplåten.

I samband med konstruktionen och innan igångsättande av värmeväxlaren måste följande saker beaktas:

- Analys av vatten som skall växlas.
- Temperaturen på vattnet och innehåll av fasta partiklar.
- Förekommer organiskt material ( $H_2S$ ) i vattnet.

I regel passerar kylvatten, som kan vara sötvatten, bräckt vatten eller havsvatten, genom tuberna, medan kylning av vattnet från processen sker på tubernas utsida.

Sötvatten kan ha mycket varierande halt av föroreningar. Kloridhalten kan variera mellan 10 till 200 mg/l.

I bräckt vatten som är en blandning av sötvatten och havsvatten kan kloridhalterna variera. Som exempel kan Östersjön anges, där kloridhalten i Bottniska viken Östersjön är ca 2000 mg/l och i de danska sunden uppgår till närmare 10 000 mg/l.

### Material i tuber

Den vanligaste skadeorsaken i tubvärmväxlare är erosionskorrosion. Risken för erosionskorrosion är störst nära inlopp och utlopp. Den viktigaste åtgärden för att undvika erosionskorrosion är begränsning av strömningshastigheten. Tabell 2.5-6 ger riktlinjer för rekommenderad strömningshastighet för olika material.

Mässing kan i vissa fall användas som tuber i sötvatten. Ett sådant exempel är mässingslegeringen SS 5220. För undvikande av erosionskorrosion måste dock strömningshastigheten begränsas. Med hänsyn till motståndskraften mot erosionskorrosion föredras oftast aluminiummässing (SS 5217) eller kopparnickel (SS 5667, SS 5682) framför mässing i bräckt vatten eller havsvatten.

Rostfria stål av typen 17-12-2,5 Mo kan användas i sötvatten. När bräckt vatten används är rostfria stål av typen 18-14-3,5 Mo och 20-25-4,5 Mo-1,5 Cu, lämpliga som tuber i vattenkylaren.

I havsvatten är risken för korrosion på rostfria stål stor och de kan endast användas under gynnsamma betingelser, d v s höga strömningshastigheter, frihet från spalter och låg temperatur. Ju högre krom- och molybdenhalter i rostfria stål, desto större är möjligheterna för användning i havsvattentillämpningar. Det höglegerade stålet 654 SMO kan användas i havsvatten, utan risk för korrosionsskador.

Titanlegeringar är vanligt tubmaterial i vattenkylare. Titan är i stort sett motståndskraftigt mot samtliga typer av korrosion i vattenlösningar. Titan kan användas i havsvatten vid temperaturer upp till 120°C. Nackdelar med titan är det höga priset och känsligheten för vibrationer som kan leda till utmattning.

**Tabell 2.5-6. Rekommenderad strömningshastighet för olika material.**

| Legering                     | Användningsområde                             | Rekommenderad strömningshastighet i m/s |
|------------------------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------|
| CuZn28Sn1, SS 5220           | Sötvatten och bräckt vatten med Cl< 300 mg/l  | ≤ 1,5                                   |
| Aluminiummässing, SS 5217    | Bräckt vatten och havsvatten                  | ≤ 2,5                                   |
| Kopparnickel 90/10, SS 5667  | Bräckt vatten och havsvatten                  | ≤ 3,5                                   |
| Kopparnickel 70/30, SS 5682  | Bräckt vatten och havsvatten                  | ≤ 4,0                                   |
| 17-12-2,5 Mo, SS 2343        | Sötvatten med Cl< 100 mg/l                    | ≤ 5,0                                   |
| 18-14-3,5 Mo, SS 2367        | Sötvatten och bräckt vatten med Cl< 1000 mg/l | ≤ 5,0                                   |
| 20-25-4,5 Mo-1,5 Cu, SS 2562 | Bräckt vatten med Cl< 10000 mg/l              | ≤ 5,0                                   |
| 654 SMO                      | Inga begränsningar                            | ≤ 5,0                                   |
| Titan                        | Inga begränsningar                            | ≤ 8,0                                   |

### Material i tubgavel och -mantel

Vanligast material i tubgavel och -mantel är ordinära ferritiska tryckkärlsstål. Även rostfria tryckkärlsstål av typen SS 2343 eller SS 2562 förekommer.



### 2.5.6.1 Skador på vattenkylare

#### Korrosion

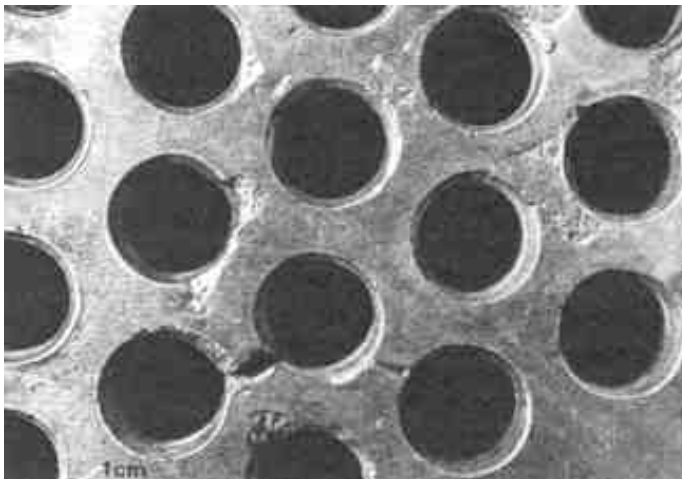
##### Erosionskorrosion

Erosionskorrosion innebär att det strömmande vattnet skadar det skyddande ytskiktet på metallen. Benämningen erosionskorrosion indikerar ett samspel mellan mekanisk erosion och kemisk korrosion och sker vid extrema strömningshastigheter.

”Strömningsinducerad korrosion” vore ett bättre uttryck, eftersom den dominerade effekten av en ökad strömningshastighet (turbulens) är en ökad masstransport av de i korrosionsreaktionen deltagande ämnena.

De frätgropar som bildas vid erosionskorrosion har i regel blanka ytor, fria från korrosionsprodukter och är oftast underskurna i strömningsriktningen.

Erosionskorrosion är i regel lokaliserad till sådana ställen där strömningen är störd. Fastän låga strömningshastigheter används för kopparlegeringar i vattenkylare, kan erosionskorrosion uppkomma, t ex vid inloppen av värmeväxlartuberna, se figur 2.5-11.



**Figur 2.5-11. Angrepp genom erosionskorrosion i tubgavlar och tubinlopp.**

**Figure 2.5-11. Erosion corrosion in tube sheet and tube inlet.**

##### Allmän korrosion

Ferritiska tryckkärlsstål som används i gavlar skall målas, för att skydda mot korrosion.

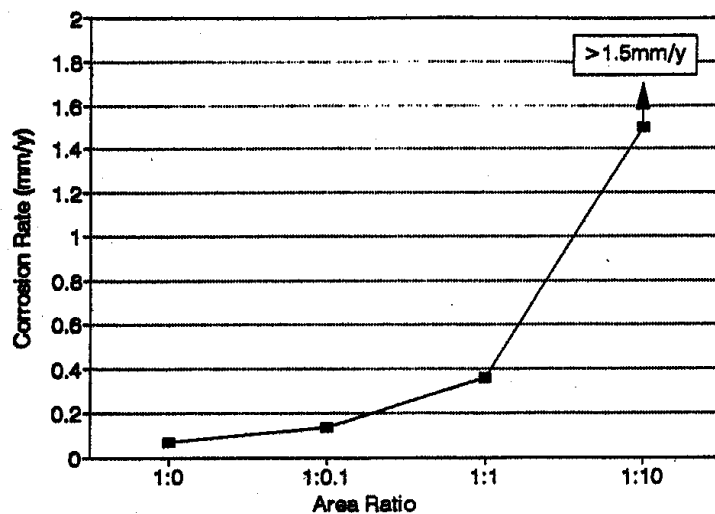
Allmän korrosion på kopparlegeringar påverkas väsentligt av speciella vattenföreningar t ex ammoniak och svavelhaltiga föreningar. I vatten innehållande ammoniak föredras kopparnickel. Även när viss halt av sulfidförening förekommer räknas kopparnickel som något mindre känslig än övriga kopparmaterial.

##### Galvanisk korrosion

Galvaniska angrepp kan uppkomma på mantel och gavel om olika metaller kopplas till varandra i kylvatten med hög konduktivitet. En galvanisk koppling mellan rostfritt stål och ordinärt stål ferritiskt stål i havsvatten innebär att det rostfria stålet blir katodiskt

skyddat. Korrosionshastigheten hos det ferritiska stålet beror även på areaförhållandet rostfritt stål/ferritiskt stål som figur 2.5-12 visar.

Kopplas kopparlegeringar mot höglegerade rostfria stål eller titanlegeringar i havsvattentillämpningar kommer kopparlegeringarna att bli oädlare i den galvaniska spänningsserien och får därmed korrosionsangrepp. Korrosion kan uppkomma i havsvattenvärmeväxlare på inloppssidan efter kort tid mellan titantuber och aluminiummässingsgavlar. Däremot finns inga galvaniska skillnader mellan olika rostfria stål, samt mellan rostfria stål och titanlegeringar.



Figur 2.5-12. Korrosionshastighet i mm/år, för ferritiskt stål kopplat till rostfritt stål i naturligt havsvatten, som funktion av areaförhållandet mellan ferritiskt stål/rostfritt stål.

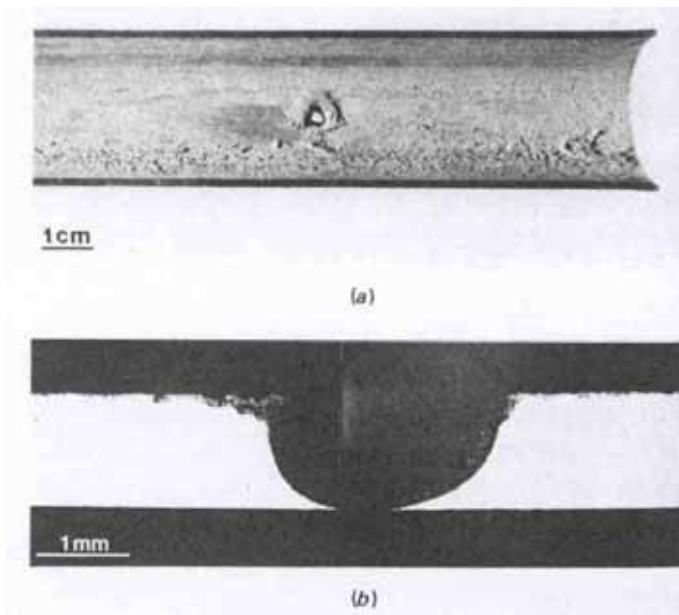
Figure 2.5-12. Graph of corrosion rate versus area rate (carbon steel/stainless steel) for carbon steel coupled to high alloy stainless steel in natural sea water.

### Gropfrätning och spaltkorrosion

Gropfrätning kallas lokal korrosion som resulterar i frätgropar i metallytan. Vid denna typ av korrosion verkar i allmänhet korrosionscellen med särskiljbara anod- och katodytor. Anoden är då belägen i frätgropen och katoden vanligen på omgivande ytor. Gropfrätning medför ofta svårare skador än jämn korrosion därigenom att den relativt snabbt kan leda till genomfrätning.

Karaktäristiskt för angrepp av typ gropfrätning och spaltkorrosion är att största delen av ytan är fri från angrepp. I det angripna området aktiveras ytan. Gropfrätning på kopparlegeringar kan uppkomma på grund av följande faktorer:

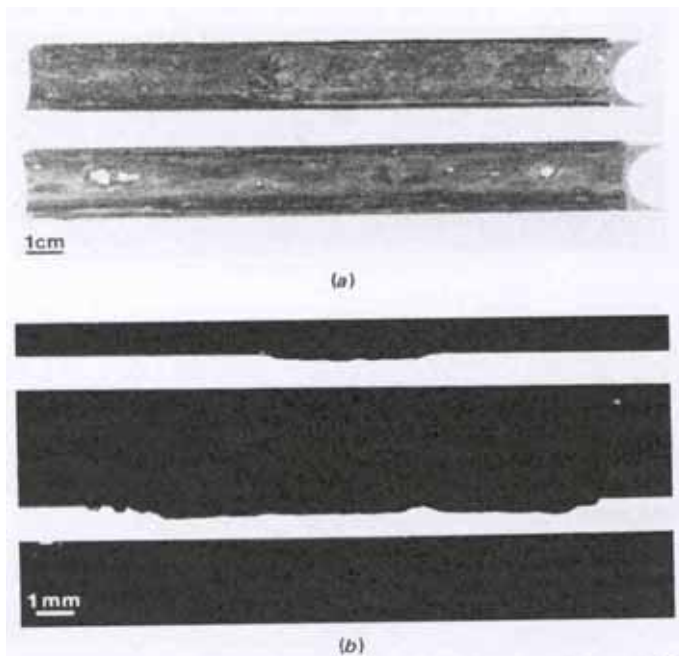
- Ojämna ytor från tubtillverkningen.
- Ufällning av olika typer av avlagringar som medför risk för lokala syre- eller metalljonskoncentrationsceller, se figur 2.5-13.
- Små metalliska inneslutningar av oxider och sulfider i ytan.
- Användning av sulfidförorenat vatten.
- Indunstning och anrikning av aggressiva ämnen under stillestånd.



Figur 2.5-13. CuZn28Sn1. Gropfrätning under avlagringar. (a) Tubyta, (b) Tvärsnitt.

Figure 2.5-13. CuZn28Sn1. Pitting corrosion under deposits. (a) Tube interior, (b) Cross section.

Spaltkorrosion på kopparlegeringar kan förekomma i sulfidförorenat vatten, se **figur 2.5-14**. Närvaro av salt och organiskt innehåll kan medföra att svavelväte bildas under stillestånd. Kopparnickellegeringar är resistent i havsvatten, men inte havsvatten innehållande sulfider.



Figur 2.5-14. CuZn28Sn1. (a) Spaltkorrosion i övre och undre tubhalva, (b) Tvärsnitt.

Figure 2.5-14. CuZn28Sn1. (a) Upper and lower half after crevice corrosion, (b) Cross section.

Gropfrätning och spaltkorrosion kan även uppkomma i rostfria stål. De orsakas av ett lokalt genombrott av den skyddande passivfilmen och uppträder företrädesvis i kloridhaltiga vattenlösningar, då en viss punktfrättnings- eller spaltkorrosionspotentialen överskrider till följd av oxidationsmedlet i vattnet. Med potential menas elektrisk potential, d v s den skillnad i spänning som uppstår mellan lösningen och stålet, då det nedsänks i en lösning. Ett oxidationsmedel är ett som upptar elektroner, vilka bildas i den elektrokemiska reaktionen när stål korroderar.

Korrosionsangrepp genom punktfrätning eller spaltkorrosion på rostfria stål kan tillväxa med en hastighet av flera millimeter per år.

Något tröskelvärde för kloridhalten i vattenlösningar kan inte anges, eftersom även andra faktorer inverkar. I många fall föreligger också i praktiken risker till lokala koncentrationsförhöjningar genom indunstning.

Riskerna för gropfrätning och spaltkorrosion är störst i stillastående lösningar och minskar om strömningshastigheten ökar. Vid hastigheter över ca 1,5 m/s är risken för gropfrätning eller spaltkorrosion liten.

Vid val av rostfria stål i kloridhaltiga lösningar, försöker man att på olika sätt rangordna materialets motstånd mot gropfrätning och spaltkorrosion. Saknas relevanta praktiska erfarenheter kan en första grov bedömning göras genom beräkning av materialets PRE-värde (Pitting Resistance Equivalent) utgående från materialets kemiska sammansättning. Krom- och molybdenhalten har en entydig positiv inverkan mot gropfrätning och spaltkorrosion. Kväve, anses ha en positiv effekt, åtminstone i austenitiska och ferrit-austenitiska rostfria stål. Följande ekvation har använts för att uttrycka detta legeringssamband:

$$PRE = \% Cr + 3.3 \times \% Mo + 30 \times \% N$$

Av ekvationen ovan skall 654 SMO ha det högsta PRE-värdet, vilket också **tabell 2.5-7** nedan visar.

**Tabell 2.5-7. PRE-värdet för rostfria stål i vattenkylare.**

| Rostfritt stål | PRE - värde |
|----------------|-------------|
| SS 23 43       | 25          |
| SS 23 67       | 30          |
| SS 25 62       | 36          |
| 654 SMO        | 63          |

### Spänningskorrosion

Spänningskorrosion orsakas av en samverkan mellan spänningar, miljö och material. Få korrosionsproblem kan komma som en så obehaglig överraskning som sprickbildning på grund av spänningskorrosion. Under olyckliga omständigheter kan en spricka initieras mer eller mindre momentant och därefter tillväxa med mycket hög hastighet.

I värmeväxlartuber kan både längs- och tvärgående sprickor förekomma, ibland i en och samma tub. Sprickorna går alltid vinkelrätt mot huvudspänningsriktningen.

Spänningskorrosionssprickor är vanligtvis förgrenade, till skillnad från sprickor orsakade av utmattningskorrosion. Risken för spänningskorrosion är som störst i områden där höga spänningar föreligger, t ex i anslutning till invalsning och på ställen där anrikning av föroreningar sker.

I värmeväxlare är spänningskorrosion främst ett problem i tuber av kopparlegeringar eller austenitiskt rostfritt stål.

Kopparlegeringar av typen SS 5217 och SS 5220 kan vara känsliga för spänningskorrosionsprickning. Risken för spänningskorrosion minskar om tuberna levereras avspänningsglödgade och om vattnets och kondensatets ammoniakhalt ej överstiger ca 0,5 mg/l.

Kopparnickellegeringar är inte känsliga för spänningskorrosion.

För att spänningskorrosion skall uppstå i ett rostfritt stål krävs förutom dragspänningar över en viss nivå, även kloridjoner och temperaturer högre än 60 °C.

Den kloridframkallade transkristallina spänningskorrosionen angriper i första hand de austenitiska stålsorterna. De ferrit-austenitiska är mindre känsliga och de rent ferritiska är helt okänsliga förutsatt att de inte innehåller nickel och/eller koppar i halter över ca 0,5 vikts-%.

#### Korrosionsutmattning

Med korrosionsutmattning avses utmattningsbrott som uppstår genom samverkan mellan upprepade mekaniska spänningsväxlingar och en korrosiv miljö. I en korrosiv miljö kan utmattningsprickor uppkomma, vid en betydligt lägre belastning än i en icke korrosiv miljö. Korrosionsutmattningsprickor är vanligtvis lokaliserade till tubplåtarna eller till lokala punktangrepp. Vid korrosionsutmattning finns det vanligtvis korrosionsprodukter i sprickan och flera parallella tunna sprickor syns i samma område.

Risken för korrosionsutmattning kan undvikas för samtliga material genom att konstruera så att skadliga vibrationer och belastningsväxlingar ej uppkommer i tuberna.

#### Mikrobiell korrosion

I olika typer av kylsystem nämns ofta mikrobiell korrosion som en möjlig skadeorsak för kolstål, kopparlegeringar, och rostfritt material. Mikrobiell korrosion kan förekomma i vattenkylare, men synes dock ha en begränsad inverkan.

Av alla de typer av mikroorganismer som kan orsaka mikrobiell korrosion är det de sulfatreducerande bakterierna som borde ha störst intresse med tanke på vattenkylare. Samtliga sulfatreducerande bakterier är anaeroba, vilket innebär att de är aktiva i syrefritt vatten. De kan överleva i syrehaltigt vatten men är då inte aktiva. Bakterierna får sin näring genom att reducera sulfat (sulfat) till sulfid. Bakterierna överlever inte temperaturer över 80 °C och pH-värden högre än 9.

För att man skall anse det bevisat att ett angrepp orsakats av mikrobiell korrosion måste följande kriterier vara uppfyllda:

- Sulfatreducerande bakterier eller restprodukter av dessa måste påvisas i anslutning till korrosionsangreppen.

- Korrosionsprodukterna måste innehålla restprodukter från bakteriernas metabolism, d v s sulfider. Analys av korrosionsprodukterna i svepelektron mikroskop med energidispersiv analysator kan utföras och då skall svavel påträffas.
- Korrosionsangreppen uppvisar ett karakteristiskt utseende av frätgropar med "årsringar" av bakteriekolonins tillväxt.
- Miljön, framförallt temperatur och pH-värde, måste vara gynnsam för sulfatreducerande bakterier. Dessutom måste det finnas tillräcklig tillgång till näringsämnen.

#### Påväxt

Två typer av vatten kan ha samma kemiska sammansättning men vattnens korrosivitet på stålytor kan vara olika. Skillnaden kan bero på mikroorganismerna som finns i vattnet, vilka har olika egenskaper på rostfria stålytor. Mikrobiologiska filmer kan i bräckt- och havsvatten bildas på rostfria stålytor. Dessa biofilmer medför att korrosionspotentialen stiger på stålytan, vilket innebär att risken ökar för initiering av gropfrätning och spaltkorrosion, samtidigt som korrosionshastigheten ökar.

På alla kopparlegeringar med mer än 70 % koppar är påväxt av organismer nedsatt beroende på att kopparjoner utlösta från metallen är giftig. Däremot anses påväxt på aluminiummässing vara ett problem, eftersom selektiv korrosion bildas under dessa beläggningar. Kopparlegeringar som innehåller aluminium anses ha en benägenhet att drabbas av påväxt.

#### *2.5.6.2 Provning av vattenkylare*

Fiberoptik kan användas för besiktning av vattenkylaren, utan att den behöver demonteras. Det finns flexibla fiberoptiska inspektionsinstrument med inbyggda ljusledare. Ett flertal längder och diametrar finns att välja mellan. Det går även att välja mellan olika blickriktningar och bildvinklar. Fiberoptiska instrument kan kopplas till en monitor via en kamera, vilket underlättar inspektionsarbetet. Speciella fiberoptiska instrument med UV-ljus har tagits fram.

Oförstörande provning med virvelström kan utföras invändigt i tuber.

Godstjockleksmätningar, t ex med ultraljud, bör utföras på mantelpartierna, eftersom korrosionsskador kan finnas i detta område.

#### *Inspektion*

Vattenkylaren bör inspekteras regelbundet för att påvisa eventuell påväxt och beläggningar. Oftast uppkommer beläggningar i tuberna. För att avlägsna dessa kan högttrycksspolning utföras och därmed blir tuberna rena och värmeöverföringen underlättas.

#### *2.5.6.3 Återstående livslängd hos vattenkylare*

För att förlänga livslängden på svart material (ej rostfritt stål) måste dessa komponenter i värmeväxlaren blästras och därefter företas en noggrann rostskyddsbehandling.

Under längre tidsuppehåll i driften är det nödvändigt att vidta åtgärder som förhindrar korrosion. Den effektivaste metoden är torrkokning, då allt vatten avlägsnas ur värmeväxlaren.

Återkommande konditionsbedömningar ger underlag för uppskattning av återstående livslängd, så att man kan planera för nödvändiga åtgärder i god tid. En bedömning av en värmeväxlares kondition och återstående livslängd kan och bör baseras på:

- Historik och statistik från anläggningen
- Kunskap om aktuella skademekanismer
- Inspektioner och undersökning av representativa tuber
- Oförstörande provning

#### REFERENSER

- Forchhammer, P. Results of damage research on corrosion failures in heat exchangers, Heat transfer engineering, vol 5, nos. 3-4, 1984.
- Tavast, J. Skademekanismer i värmekondensorer, Värmeforsk kemiteknik rapport 500, ISSN 0282-3772, April 1994.
- Avesta Sheffield CORROSION HANDBOOK for stainless steels, ISBN 91-630-2122-6, Sandviken 1994.
- Eriksson, F. Aluminiumbronsers korrosionsegenskaper-En litteraturstudie, Korrosionsinstitutet KI Rapport 1985:1, 1985-05-22.
- Nikolakakos, S. Cooling water systems components-Part 1, Corrosion and Corrosion Protection methods, Corrosion March 22-26, 1982, Houston, Texas, USA.
- Francis, R. Galvanic corrosion of high alloy stainless steels in sea water, British Corrosion Journal, Vol.29, No.1 (1994), pp 53-57.



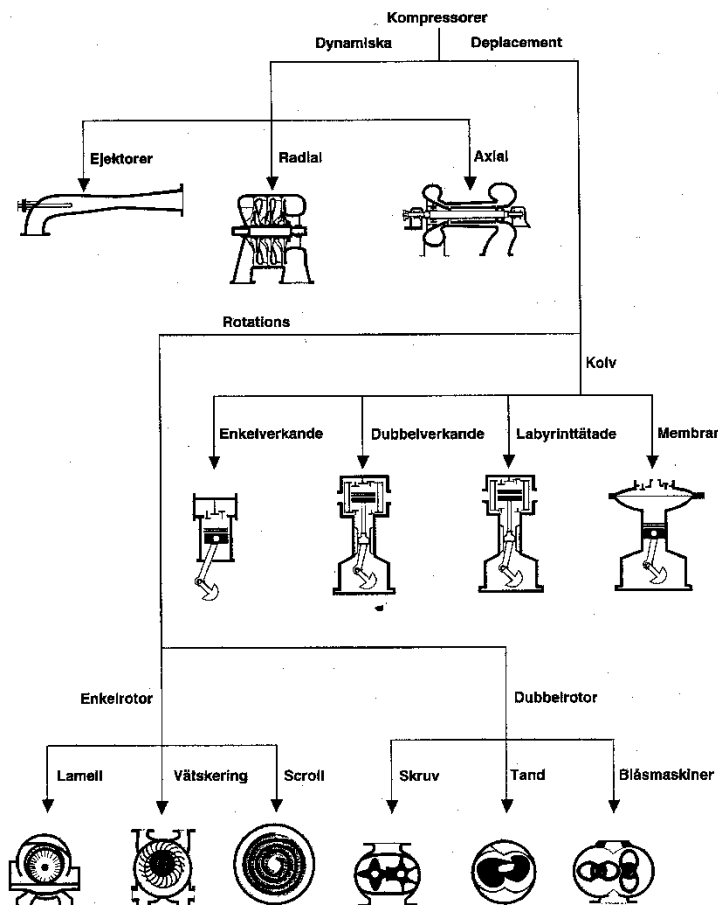
## 2.5.7 Kompressorer

### Funktion

Principen för en kompressor är att den suger in gas av ett visst tryck och efter kompression levererar den vid ett högre tryck. Det gäller att gasens sammansättning, som oftast utgörs av luft, inte får undergå någon förändring. Den komprimerade luften transporteras vidare till en torkutrustning. Önskvärt vore att luften hade samma temperatur som före komprimeringen. Detta är endast möjligt om kompressionen sker mycket långsamt eller under kraftig kylning.

Om man komprimerar luften från begynnelsestryck till sluttryck i ett enda steg, blir den kraftigt uppvärmd. Man avbryter därför kompressionen en eller flera gånger och kyler ned luften, innan nästa tryckhöjning påbörjas. Detta kallas att komprimera i ett eller flera steg.

Kompressorer skiljer sig från pumpar därigenom att mediet är kompressibelt. Det finns två grundprinciper för kompression av luft, displacementprincipen och dynamisk kompression. Schemat över de vanligaste kompressortyperna uppdelade efter arbetsprincip visas i Figur 2.5-15.



Figur 2.5-15. Schema som visar de vanligaste kompressortyperna uppdelade efter arbetsprincip.

Figure 2.5-15. The diagram shows the most common compressor types distributed by the function.

Bland displacementkompressorerna finns exempelvis kolvkompressorer och rotationskompressorer av olika typer. De är de vanligaste kompressorerna i de flesta industrier.

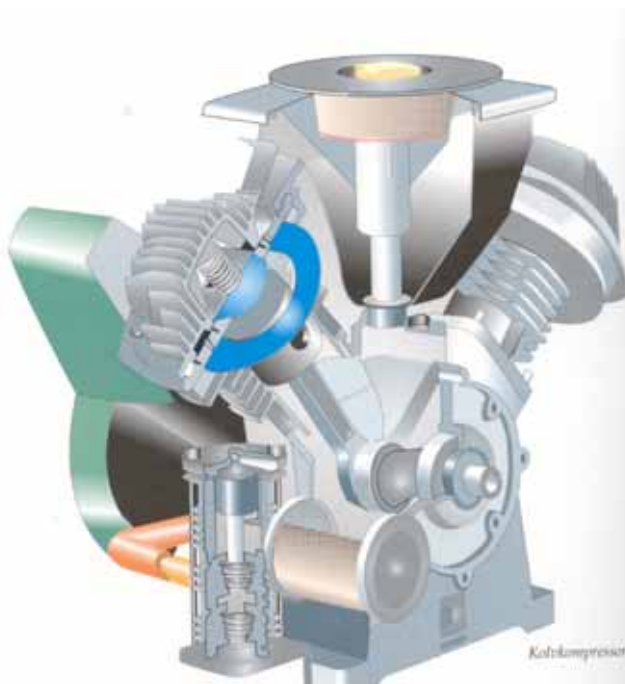
För till exempel en kolvkompressor sugas luften in i en kompressionskammare, vilken stängs av från inloppet. Kammarens volym minskas därefter och luften komprimeras. När trycket har nått samma nivå som trycket i utloppsledningen, öppnas en ventil och luften släpps ut med konstant tryck, under fortsatt minskning av kompressionskammarens volym.

I den dynamiska kompressorn sugas luften in i ett snabbt roterande kompressorhjul och accelereras till hög hastighet. Gasen släpps sedan ut genom en diffusor, där rörelseenergin omvandlas till statiskt tryck. Det finns dynamiska kompressorer med axiellt eller radiellt flöde. De lämpar sig samtliga för större volymflöden.

#### *Konstruktion*

##### Kolvkompressor

Kolvkompressorn är den äldsta och vanligaste av alla kompressorer. De finns som enkel- eller dubbelverkande, oljesmorda eller oljefria och med olika antal cylindrar i olika konfigurationer. I huvudsak består en kolvkompressor av ett vevhus med vevaxel, vevstake, kolv och cylinder. Cylindern är försedd med insugnings- och tryckventiler. Med undantag för de allra minsta kompressorerna med vertikal cylinder är V-konfiguration vanligast för mindre kompressorer, se Figur 2.5-16.



**Figur 2.5-16. Kolvkompressor.**

**Figure 2.5-16. The piston compressor.**

För att leda bort kompressionsvärmén brukar kompressorcylindrar och andra ytor som kan påverka temperaturen kylas i så stor utsträckning som möjligt. Det viktigaste är

dock att kyla luften mellan de olika kompressionsstegen. Detta sker i en mellankylare som kan vara luft- eller vätskekyld.

### Skruvkompressor

Skruvkompressorn är en roterande displacementkompressor, Figur 2.5-17.

Kompressorn görs skruvformad och på så sätt sker en successiv kompression av luft mellan sug- och trycksidan. Skruvelementets två huvuddelar är skruven och sliden, vika rör sig mot varandra under det att volymen mellan dem och huset minskar. Varje skruvelement har ett fast inbyggt tryckförhållande som beror på dess längd, skruvens stigning och utloppsportens utformning. För bästa verkningsgrad måste tryckförhållandet anpassas till önskat arbetstryck

Skruvkompressorn saknar ventiler och har inga obalanserade mekaniska krafter. Därför kan den arbeta vid höga varvtal och kombinerar stora flöden med små yttre dimensioner. En axiellt verkande kraft beroende på tryckskillnaden mellan insug och utlopp måste dock tas upp av lagringen.



**Figur 2.5-17.** Ett steg i en oljefri kompressor. Skruv och slid ligger lagrade i rotorhuset som är vattenkyld.

**Figure 2.5-17.** One step in an oil free compressor. The screw and the sheath are storage in the water cooled rotor house.

I kraftvärmeindustrin används vanligen tvåstegs elmotordrivna skruvkompressorer som ger oljefri luft. Kompressorn är vattenkyld.

Vanligtvis är kompressorerna inbyggda i en ljudisolerad huv och omfattar huvudsakligen: luftfilter, lågtryckkompressorelement, mellankylare, högtryckskompressorelement, efterkylare, elektrisk motor, drivkoppling, växelhus och säkerhetsventiler.

Drivkraften för kompressorer är vanligtvis elmotorer.

### 2.5.7.1 Skador på kompressorer

#### Lagerskador

De allvarligaste skadorna på kompressorer är lagerskador och dessa är mycket svåra att förutsäga. Oftast finns kompressorer i maskinrum tillsammans med andra komponenter och en följd av detta är att det blir svårt att upptäcka skador i tid hos enskilda kompressorer, eftersom de vid skador för ett gemensamt oväsen. Automatiserad stötpulsmätning ger dock en tidig varning. Lagrens kondition kan mätas regelbundet och en trendkurva kan förvarna om ett haveri är nära förestående.

#### Vibrationer

De vanligaste orsakerna till vibrationer i en kompressor är obalans som i sin tur orsakas av:

1) feluppriktning, 2) böjda axlar, 3) lagerdefekter, 4) excentricitet, 6) friktion och 7) resonans.

Även om maskiner sammankopplas med flexibla kopplingar, är en noggrann uppriktning av största betydelse. En god montering ger lugnare gång och ökar livslängden hos lagren och koppling. Moderna kompressorer är direktflänsade och därmed kan feluppriktning uteslutas.

Böjd axel ger obalans och lagerdefekter orsakar typiskt vibrationer genom t ex försämrad dämpning vid kraftigt slitage som kan medge att en tidigare acceptabel restobalans medför vibrationer.

Med excentricitet menas när tyngdpunkten är förskjuten från t ex axelns centrum. Detta kan medföra obalans som i sin tur medför vibrationer.

Friktionen kan orsaka att en begränsad del av omkretsen får en temperaturhöjning som medför krökning och därmed obalans.

Resonans är då svängningsskällans svängningstal och maskinen den är kopplad till har samma svängningstal. Amplituden når sitt maximum vid resonans och resonansens skärpa avtar med dämpningen i det svängande systemet. Resonans är mycket skadligt för ett maskinsystem med elmotor, koppling och kompressor.

#### Korrosion

Korrosion kan uppkomma på grund av utfällning av kondensvatten. Det finns i princip fyra metoder att avlägsna fukt ur den komprimerade luften: kylning, överkomprimering, absorption och adsorption. En efterkylare är en värmeväxlare som kyler den heta tryckluften för att fälla ut huvuddelen av det vatten som annars skulle fällas ut i ledningsnätet.

### 2.5.7.2 Provnings av kompressorer

Vanligtvis sker övervakning av komponenten genom att den är föremål för regelbunden service t ex byte av olja, motorns fett, oljefilter och luftfilter. Meddelande, vanligtvis på en display, kommer upp som varnar att den indikerade komponenten skall bytas, eller att motorn skall smörjas. Dessutom finns både tryck- och temperaturmätare på låg- och högtryckselementen. Vanligtvis sker även mätningar av oljans och kylvattnets temperatur och tryck.

Dagligen brukar oljenivå och kondensat kontrolleras. Rengöring av luftfilter sker var sjätte månad. Årligen brukar olje- och luftfilter bytas och säkerhetsventiler provas.

#### 2.5.7.3 Återstående livslängd hos kompressorer

Lagerlivslängden är avgörande för kompressorns livslängd. Oljans egenskaper i lagren är utomordentlig viktig. I skruvkompressorerna finns för varje skruv fyra stycken lager. Livslängden för lagren uppskattas till mellan 40 000 och 120 000 timmar.

En mycket stor del av en kompressors kvalitet beror på dess smörjsystem. En rätt utförd smörjning medför pålitlig drift och lägre kostnader för underhåll, energiförbrukning och smörjning.

Viktigt är att placera aggregatet där omgivningsluften är så sval och ren som möjligt. Vid behov kan en sugkanal installeras. Svavelhaltiga förbränningsgaser eller saltmättad luft uteluft får inte ges möjlighet att tränga in i sugkanalen. Luftintaget skall aldrig täckas över och ingen fukt skall komma in med insugningsluften. Denna skall även vara fri från brandfarliga ångor eller gaser, t ex färglösningsmedel, som kan leda till invändig brand eller explosion.

Livslängden för ett kylsystem kan höjas genom att använda slutet system bestående av avsaltat vatten.

#### REFERENSER

Atlas Copco, Tryckluftshandboken, Stockholm 1998.

Atlas Copco, Stationära Luftkompressorer., Instruktionsbok maj 2002.

Ulvås, C, Energi, Lund 1974.

Installations- och skötselanvisning Veneto kylaggregat 45 – 1000 kW, Kinnan AB, Enköping.

Kaeser kompressor online 2002.

### 2.5.8 Rök-gaskondensering

Rök-gaskondensering är en metod för att utvinna värmeenergi ur rök-gaser från förbränning i ett värmeverk eller ett kraftvärmeverk. Beroende på vilket bränsle som används så innehåller rök-gaserna en viss mängd vattenånga och genom att kyla ner rök-gaserna under vattenångans daggpunkt får man denna att kondensera, varvid kondensationsvärmen frigörs. Värmen kan tas omhand och tillförs vanligtvis ett fjärrvärmenät eller ett lokalt värmesystem.

Genom att koppla in en värmepump över kylstegen kan energiåtervinningen och anläggningens verkningsgrad ökas ytterligare. Som grova överslag kan sägas att en kondenseringsanläggning utan värmepump kan öka energiuttaget ur bränslet med upp till ca 15 % av panneffekten. Motsvarande siffra för en anläggning med värmepump är drygt 20 %. Med låga returtemperaturer och uppfuktning kan förbättrad verkningsgrad bli ännu högre och den totala verkningsgraden kan uppgå till 90-95 %. Detta kan ställas mot att de flesta förbränningsanläggningarna i Europa enbart producerar elektricitet, och detta med en total verkningsgrad på 30-50 %.

Det kondenserade vattnet kommer oavsett metod att ta med sig föroreningar, vilket innebär renare rök-gaser men också att rening av kondensatet krävs.

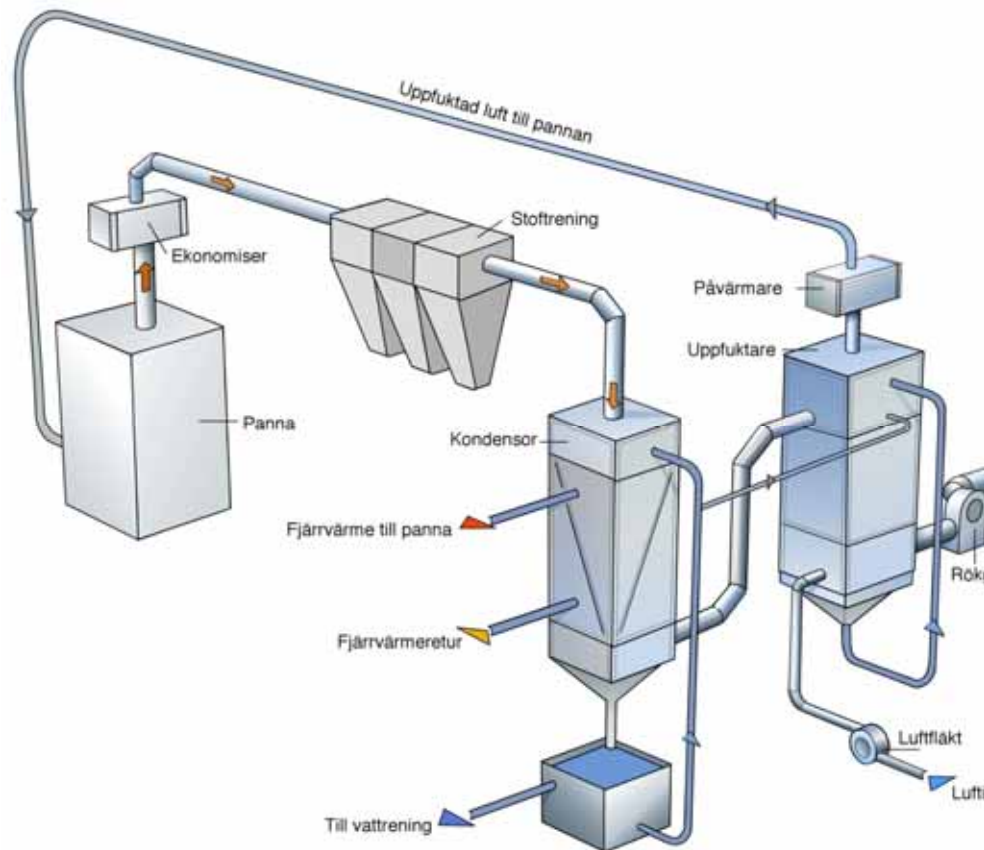
Rök-gaskondensering är framförallt intressant vid användning av bränslen med hög fukthalt, som avfall, trädbränslen och torv samt sådana med hög andel kväve, t.ex. naturgas.

Under 1990-talet uppfördes ett antal nya kraftvärmeverk och värmeverk med rök-gaskondensering. Många befintliga biobränsleeldade anläggningar både med och utan kraftproduktion har kompletterat sin produktionskapacitet av värme med en rök-gaskondensor. Motivet till att bygga rök-gaskondensor trots att man har kraftproduktion var framförallt att elpriset är lågt och värmepriset är förhållandevis högt. Trots stora svängningar i elpriset sedan dess uppförs nya kraftvärmeverk med rök-gaskondensering.

En rök-gaskondenseringsanläggning består av följande delar:

- Rök-gaskondensor
- Kondensatrening
- Uppfuktare (används framför allt vid torrare bränslen)

Figur 2.5.8-1 visar hur en rök-gaskondenseringsanläggning typiskt är uppbyggd.



Figur 2.5.8-1. Typisk uppbyggnad av en rökgaskondenseringsanläggning

Figure 2.5.8-1. Typical layout of a flue gas condensing device

### Rökgaskondensor

Nedan beskrivs förekommande metoder för kylningen av rökgaserna.

#### Tubkondensor

Tubkondensorn fungerar på samma sätt som en tubvärmväxlare. Det värmeupptagande

mediet, i de flesta fall fjärrvärmevatten, passerar på utsidan av rören nerifrån och upp.

Det värmeavgivande mediet som är kondenserande rökgaser passerar på insidan av rören uppfifrån och ner. Den värmeöverförande processen blir på så sett motströms.

#### Plattkondensor

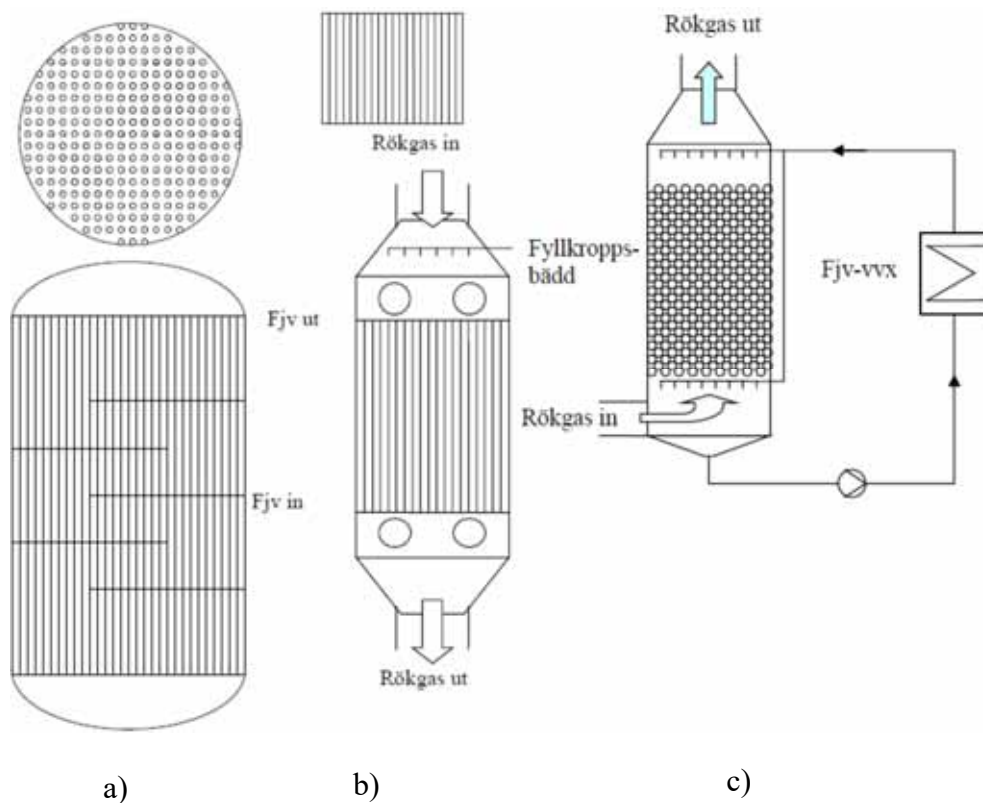
Plattkondensorn är av samma princip som en tubvärmväxlare med den skillnaden att medierna skiljs åt av plattor istället. Den fungerar också som en motströmsvärmväxlare. Plattorna tillverkas genom att två plåtar punktsvetsas ihop, sedan svetsas kanterna på plåtarna ihop varefter plattan blåses upp under tryck. Vattnet fördelas in i plattan medan rökgaserna passerar utvändigt.



### Skrubber, fyllkroppskondensor

I skrubberkondensorn sker kondensationssteget och värmeöverföringen till fjärrvärmevattnet i två separata steg. Kondenseringen sker i skrubbern där kondensatvatten sprayas över en fyllkroppsbädd för att öka vattnets värmeväxларыta mot rökgasen. Fyllkropparna kan t.ex. vara cylindriska, tillverkade av plast (polypropylen), keramer eller rostfritt stål och har ett skelettlikt utseende. Utformningen går ut på att skapa många droppar så att massutbytet mellan vätska och gas ökar. Rökgasen rör sig nerifrån och upp genom fyllkroppsbädden medan kondensatvatten faller ner, motströms rökgasen genom fyllkroppsbädden. När kondensatvatten passerat fyllkroppsbädden samlas det upp och leds ut från kondensorhuset och sedan via en pump genom en plattvärmeväxlare där kondensatvatten värmeväxlas mot fjärrvärmevattnet. Därefter sprayas kondensatvatten återigen in i kondensorhuset.

Principskisser på tub-, platt- och fyllkroppskondensorn visas i Figur 2.5.8-2.



**Figur 2.5.8-2** Principskisser av a) tubkondensor, b) plattkondensor och c) fyllkroppskondensor [Värmeforskrapport 719]

**Figure 2.5.8-2** Outlines of a) tube condenser, b) plate condenser and c) scrubber [Värmeforsk report 719]

### *Kondensatrening*

En del av kondensatvattnet tappas kontinuerligt av för rening för att slutligen släppas till reningsverk eller recipient. Reningsutrustningen kan bestå av en mängd olika steg:

- pH-justering
- Tillsättning av flockningsmedel kan ibland behövas för att göra de suspenderade ämnena lättare att avskilja i sandfilter eller lamellseparator.
- Sandfilter, används för att tvätta kondensatet från stoft och metallpartiklar.
- Smutsvattnet från sandfiltret leds ofta till en lamellseparator för att ytterligare koncentrera smutsvattnet.
- Sedimenteringstank/slamtank i vilken man låter smutsvattnet sedimentera och bilda slam.
- Vid hårda myndighetskrav på ammoniakutsläpp i kondensatet kan ammoniakavskiljning behövas.

### *Uppfuktare*

När rökgaserna har kylts ner till under fjärrvärmereturens temperatur, kan ytterligare vatten kondenseras ut (och därmed ytterligare energi tas ut) om man fortsätter kylningen ner till ännu lägre temperatur. Detta görs i så fall i uppfuktningssteget, där rökgaserna efter kondensorn växlas mot den inkommande förbränningsluften samtidigt som kondensat sprayas in i luften. Värmeenergi och fukt överförs från rökgasen till luften. Luften som leds till pannan är därmed betydligt mer energirik än utan uppfuktning.

Uppfuktaren gör att pannan fungerar som en värmepump som överför vattenångans energiinnehåll från en låg temperatur till en högre. Uppfuktningen innebär att förångat vatten cirkuleras genom pannan vilket ger en ökad fukthalt i de utgående rökgaserna. Det medför att daggpunkten hos rökgaserna ökar. Med ökad daggpunkt ökar den utvinnbara energin. Daggpunkten i rökgaserna utan uppfuktning ligger ofta runt 60-62°C. Med uppfuktning ökar denna temperatur upp till 70-72°C. Den ökade fukthalten innebär med andra ord att mer energi kan tas ut i kondensorn.

Det finns tre olika typer av uppfuktare; spraytorn, roterande värmeväxlare och korsströmsplattvärmeväxlare.

#### Spraytorn

Denna typ av uppfuktare används med fördel tillsammans med en fyllkroppskondensor, se

Figur 2.5.8-1c. Vattnet som värmts upp av rökgaserna i kondensorn sprayas in i ett spraytorn i vilket luften uppfuktas genom att det varma vattnet förångas på en fyllkropp.

#### Roterande värmeväxlare

Den roterande uppfuktaren fungerar genom att ett hjul av ett poröst material roterar mellan de utgående rökgaserna och inkommande luften. Luften värms upp och befuktas av hjulet som i sin tur har blivit uppvärmt av rökgaserna. För att få maximal uppfuktning av luften finns även spoldysor som sprayar vatten över uppfuktaren på luftens inkommande sida, se Figur 4.4.

### Korsströmsplattvärmeväxlare

I en korsströmsplattvärmeväxlare leds rökgaserna och luften in på varsin sida i en plattvärmeväxlare med korsande flödesriktningar, det vill säga rökgas och luft kommer inte i kontakt. Vatten sprayas in i det inkommande luftflödet för att uppfukta luften.

#### *Rökgasfläkt*

Rökgasfläktens kapacitet behöver oftast ökas vid installation av en rökgaskondensor med uppfuktning eftersom det ger större luftflöde genom pannan.

Detta kan göras antingen genom att ersätta den befintliga fläkten med en större fläkt eller genom att installera en boosterfläkt. Boosterfläkten placeras antingen före eller efter kondensorn. Varje placering har olika för och nackdelar.

Om fläkten placeras före kondensorn, alternativt om man ersätter den befintliga rökgasfläkten med en större, arbetar fläkten i en varm och torr miljö och kan tillverkas av ett billigare, svart material. Tillförd fläktenergi kan dessutom tas tillvara i rökgaskondensorn. En nackdel är att rökgasen har lägre densitet och innehåller mer vattenånga vilket följaktligen kräver större fläkthjul.

Om boosterfläkten placeras efter kondensorn arbetar den i en fuktig, korrosiv miljö vilket ställer högre krav på fläktmaterialet, det kan till och med behöva vara gummerat. Genom att återvärma rökgaserna efter kondensorn men före fläkten kan ett enklare material användas i fläkten. Eftersom massflödet minskar på grund av det kondenserade vattnet krävs lägre motoreffekt på fläkten, fläkthjulet blir också mindre. En annan fördel är att man får undertryck i kondensorn vilket kan underlätta vid service. Skador, provning och återstående livslängd hos rökgasfläktar behandlas i avsnitt 2.5.3 Rökgassystem.

#### *Material*

Traditionellt materialval hos rökgaskondensorer i biobränsleeldade anläggningar är syrafast stål, 316L (EN 1.4404, EN 1.4435) i både kondensorinlopp, värmeväxlare, rökgaskanaler efter kondensorn samt i skorstenar. Under senare år har duplexa stål som 2205 (EN 1.4462) blivit allt vanligare pga. mycket god korrosionsbeständighet kombinerat med god hållfasthet.

I samförbränningsanläggningar och i anläggningar med biobränsle och sorterat avfall kan det finnas behov av material med ännu bättre korrosionsmotstånd, t.ex. material 254 SMO till övre tubplatta i tubkondensorer. Lining med teflon förekommer. Glasfiberarmerad plast (GAP) används också, särskilt i de kallare delarna efter kondensorn, där både rökgaskanal och skorsten kan vara linade med GAP.

För anläggningar eldade med hushållsavfall rekommenderas i regel glasfiberarmerad plast (GAP) till hela rökgaskondenseringsystemet utom i värmeväxlare där 2205 eller 254SMO rekommenderas. För skrubberkondensorer med separata värmeväxlare rekommenderas titan.

Vad gäller GAP finns det olika sorters glasfiber samt harts att välja bland. En del av dessa lämpar sig sämre för rökgaskondenseringsanläggningar än andra.

Lining med polypropenplast (PP), glas- och mineralflake samt inklädnader med butylgummi är alternativa materialval. Dessa materialtyper är inte standardiserade och enhetliga. Man bör alltså tänka på att variationer i egenskaperna kan förekomma

mellan olika tillverkare. Det kan t.ex. vara skillnad i korrosions- och åldringsegenskaper.

Materialval för rökgaskondenseringsanläggningar behandlas mer ingående i Värmeforsk-rapporterna 800 (Goldschmidt 2003), 902 (Nordling et al.) och 1220 (Stenqvist 2012), där rapport 902 utöver metaller även omfattar olika typer av GAP samt även PP, glasflake och gummi.

#### 2.5.8.1 Skador hos rökgaskondenseringsanläggningar

Processen medför att olika syror kondenserar ut och följaktligen är korrosion den dominerande skademekanismen. Allmänkorrosion, gropfrätning och spaltkorrosion är alla vanligt förekommande. Risken för korrosion är starkt förknippat med bränsle, materialval samt konstruktion. Rökgaskanaler, inlopp till kondensor samt de översta partierna i värmeväxlaren är i regel mest utsatta för korrosion.

Spänningskorrosionssprickning kan förekomma i sura kloridmiljöer och vid indunstning av kondensat. Även erosion samt vibrationer i värmeväxlartuber som leder till tubbrott pga. utmattnings har rapporterats.

Hos komponenter tillverkade av GAP förekommer i stort sett de korrosionsformer, inklusive spänningskorrosionssprickning, som kan uppträda hos metaller. Det finns dessutom specifika typer av skador som blåsbildning i skrubbrar och skorstenar. Delaminering kan uppstå i rökgaskanaler och skorstenar, vilka utsätts för hög temperatur. Svällning uppstår då lösningsmedel och i viss mån även vatten kan absorberas i plasten. Ytterligare en typ av skada som är specifikt för GAP är ytkrackelering som kan uppstå i t.ex. skrubbrar och skorstenar som utsätts för omväxlande våt och torr miljö.

#### 2.5.8.2 Provnings av rökgaskondenseringsanläggningar

Kanaler, inlopp och värmeväxlare inspekteras visuellt med avseende på korrosionsangrepp. Eventuella spalter ska identifieras och kontrolleras. Tjockleksmätning med UT utförs för att kvantifiera allmänkorrosion i rökgaskanaler, inlopp till kondensor m.m. Tuber i tubvärmeväxlare provas med ET, varvid eventuell lokal godsförtunning och sprickor kan detekteras. Allmänkorrosion kan dock endast påvisas grovt och kan mer ses som en screening av reducerad godstjocklek med hjälp av ET, se **avsnitt 1.6.4**.

För komponenter tillverkade av GAP används följande metoder för oförstörande provning:

- Värmekamera – större defekter i tunnare gods (upp till 8 mm) kan detekteras.
- UT – detektering av defekter och mätning av godstjocklek. Jämfört med provning på metalliska material är resultaten inte lika precisa och inte lika lätta att tolka. I praktiken är det också ofta svårigheter med att hitta material att kalibrera mot.
- Fuktmätare – kan kvalitativt mäta eventuell vattenpåverkan i GAP eller eventuella läckage i fogar.
- Spektroskopi med mätmetoderna FTIR (Fourier Transformed Infrared Spectroscopy) och Raman med handhållna instrument – oförstörande mätning i fält för identifikation av termoplast- och hårdplastmaterial.
- Penetrantprovning för ytbrytande spricksökning
- Hårdhetsmätning – kan användas för att kontrollera grad av uthärdning och utförs med en så kallad Barcolmätare.

- Digital röntgen – kontroll av tjocklek, kantförskjutningar. Begränsad förmågan att upptäcka sprickor och delamineringar. Provning kan utföras under drift.

I Värmeforskrappport 1165 Handbok – Statusbedömning av polymera material i rökgassystem beskrivs provning av komponenter av GAP och termoplaster i mer detalj.

En vanlig förstörande metod är uttag av rondeller från en komponent av GAP. Genom att studera ytorna sam preparerade tvärsnitt kan korrosionsangrepp och status med avseende på åldring, sprickor, delaminering, blåsbildning, fukthalt m.m. karaktäriseras.

#### 2.5.8.3 Återstående livslängd hos rökgaskondenseringsanläggningar.

Hos komponenter som utsätts för allmänkorrosion och är tillverkade av metall kan återstående livslängd bedömas genom resultat från tjockleksmätning. För att kunna göra en riktig bedömning är de nödvändigt att:

- Utföra tillräckligt omfattande mätningar så att resultaten är representativa.
- Mäta vid tillräckligt antal tillfällen för att kunna fastställa representativ korrosionshastighet.
- Bestämma vid vilken godstjocklek livslängden är förbrukad.

I fall av att signifikant korrosion är ett faktum är det också lämpligt att bestämma om, och i så fall hur, livstidsförlängning genom reparation är ett möjligt alternativ till att byta ut hela komponenten. Om oacceptabla korrosionshastigheter föreligger bör man studera alternativa materialval. Föreligger spänningskorrosionssprickning är det viktigt att dels lokalisera all sprickbildning och byta ut eller reparera berörda komponenter och dels fastställa bakomliggande orsaker för att möjliggöra åtgärder som förhindrar fortsatt sprickbildning.

För komponenter tillverkade av polymera material utförs ett lämpligt urval av de metoder som så till buds i syfte att fastställa status med avseende på degenerering av materialet. Kriterier för vilken grad av degenerering som är oacceptabel måste bestämmas. Sedan gäller det att bedöma vilken eller vilka former av degenerering som är kritisk och med vilken hastighet detta sker. Erfarenheten och inte minst möjligheterna till att analysera skadetillväxt är begränsade jämfört med metalliska material. Det kan i många fall leda till osäkra bedömningar. Program för återkommande kontroller behöver anpassas till detta faktum, innebärande inledningsvis relativt täta kontroller. I fall där utvärderingen av kontrollerna pekar på tydliga trender kan mer tillförlitliga bedömningar göras, vilket i sin tur kan medföra att förlängda inspektionsintervall kan rekommenderas.

## 3 Exempel

### 3.1 LIVSLÄNGDSANALYS AV EN ÅNGTURBIN I ETT KRAFTVÄRMEVERK

#### Sammanfattning

Många kraftvärmeverk har uppnått och även överskridit sina beräknade livslängder för kritiska komponenter som ångpannor, turbiner och ångledningar. Energibolag i Sverige saknar idag effektiva verktyg för att bedöma de rätta och mest kostnadseffektiva investeringar i anläggningarna. Det faktum att vissa stora energibolag dessutom har olika energislag (t.ex. vattenkraft eller kärnkraft) att välja mellan gör inte valet enklare. Den här utredningen beskriver ett pilotförsök där en metod för att utföra livstidsstudier har testats på ett kraftvärmeverk i Hässelby utanför Stockholm. Anläggningen ägs av Birka Värme Stockholm AB och drivs av Birka Service AB. Föreliggande rapport utgör ett exempel på en livslängdsanalys i Värmeforsks handbok för livslängdsarbete med energianläggningar.

Livslängdsanalysen inkluderar förutom identifiering av kritiska komponenter och system även en riskstudie där miljömässiga, ekonomiska och personella risker bedöms. I resultatet av studien redovisas ett förslag till en modell för att prioritera och bedöma olika investeringar i anläggningen baserat på riskbedömningar. Metoden som används för att välja ut kritiska komponenter och system baseras på feleffektsanalys. Metoden beskrivs närmare i arbeten av Fritz (Fritz 1990) och Bjurström (Bjurström 1998). Feleffektsanalys har valts genom att det är den mest ekonomiska och praktiska metoden att använda för en anläggning av den storleken som den som studerats. Enbart de mekaniska komponenterna och främst tryckkärnen har studerats. Yttre delar som turbin, kvarnar och stryr/regler-utrustning har inte ingått.

Arbetet har utförts som ett nära samarbete mellan materialspecialister och drift- och underhållspersonal från anläggningen vilket har varit en framgångsrik arbetsform. En lista på de mest kritiska komponenterna har utarbetats där olika riskfaktorer har vägts samman. Ett tiotal komponenter har klassats som högriskkomponenter och ett 20-tal som medelriskkomponenter. Exempel på högriskkomponenter är ångkylaren och högtrycksångsystemet som har de högsta riskfaktorerna. Bedömningen har för dessa komponenter baserats på risken för svåra personskador vid haverier. Investeringar i dessa båda system har därför också fått en hög prioritering i slutanalysen. I en riskbaserad provningsplan har tillståndskontroll för de närmaste 10 åren föreslagits. Provningsplanen är också ett utmärkt redskap för att komplettera de årliga kontrollerna i anläggningarna och uppnå en ökad säkerhet och tillgänglighet i anläggningen. Resultatet visar att feleffektanalyser är ett utmärkt redskap för att basera såväl ett planerat underhåll som att tjäna som ett bas för en prioritering av investeringar i kraftvärmeverk.

## Summary

Many power plants in Sweden have reached and even exceeded their designed lifetime of critical components as boilers, turbines and steam systems. Energy companies in Sweden suffer from effective tools for selection of the right and most successful investments in order to be cost-effective in their Power Plants. The fact that they might also have various energy sources (i.e. nuclear and water energy) to chose between doesn't makes things easier. This paper presents results from a pilot test of a method for lifetime analysis of a steam boiler in Hässelby energy plant located outside Stockholm, Sweden. The boiler is owned by Birka Energy AB and operated by Birka Service AB. This report makes an example of a life time analysis in part three in the handbook for life time assessment by the Thermal engineering Research Institute (Värmeforsk) in Stockholm, Sweden. The investigation is also reported separately in Värmeforsk report XXX. The lifetime analysis includes economical, environmental and personal risks for the components involved. The result of the analysis is included in a model for selection of the right time for an investment and also how to rank different investments. The method that has been used and tested is based on Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) and is described by Fritz (Fritz 1990) and Bjurström (Bjurström 1998). FMEA has been used for selection of critical components in the boiler and for identifying the most important factors, which influence a lifetime analysis, and the aging management of the boiler. The result of the analysis is then included in the model and results in a risk table where the investments could be ranked in accordance with their risk with respect to personal-, economical and environmental risk. The mechanical components in the furnace, the superheater, the economiser, the flue-gas channels and the main steam line have been included in the analysis. Data from the turbine, mills and external boiler equipment are excluded in this study. Electrical- and control components are also excluded.

The work has been carried out as a close collaboration between material specialists and operation staff from the plant and the work has been very successful. Interesting results have been achieved through this collaboration and it has been possible to include elements in the analysis such as personnel hazards and environment impacts from failures. A list of the most critical components has been compiled where different risk factors have been combined. A number of ten components have been classified as high-risk components and 20 as middle risk components. The steam cooler and the super heated steam system have the highest risk number. This is based on their high risk of personal hazard for these components during a failure. Investments in these systems have also been highly prioritized in the final analysis. The condition of the components has also been tested according to a risk based testing program, which includes the coming 10 years of operating. The result shows that this method is an effective tool for planning of the maintenance and to prioritize the investments in a plant and increasing the degree of safety and availability of the plant



### 3.1.1 Bakgrund

I Sverige finns ett antal energianläggningar som projekterades på 60- och 70-talet och som genom åren har byggts om i olika etapper och bl a konverterats mellan olika bränsletyper. Av tillgänglig statistik (Tillgänglighetsstatistik 1996) framgår att tillgängligheten i genomsnitt har varit hög men att driftstörningarna ändå uppgår till ca 3 % av den totala tillgängligheten vilket betyder att väsentliga belopp går förlorade varje år för energiverken. När anläggningarnas drifttid börjar närma sig den dimensionerade livslängden på 100 000 timmar och däröver, ökar också risken för åldringsskador, främst till följd av utmattning och krypning, men även risken för korrosionsskador ökar betydligt med åldern. Intresset är idag stort att nyttja anläggningarna utöver den dimensionerade livslängden varför anläggningsägarens motivation att bedöma den återstående livslängden kommer att öka under kommande år.

Värmeforsk har prioriterat området vilket bland annat resulterat i denna handbok. I ett annat Värmeforskprojekt (Bjurström 1998) har en studieresa till Japan genomförts där ett antal intressanta metoder har studerats och redovisats. För att undersöka en av dessa metoder på en befintlig anläggning i Sverige har Värmeforsk beställt en studie av Birka Teknik & Miljö. Projektet utförs i samarbete mellan Birka Teknik & Miljö, Birka Service, Birka Värme Stockholm och Fortum Power and Heat. Studien skall ses som ett första försök till applikation av ett helhetsbegrepp kring problematiken livslängdsbedömningar av energianläggningar och bör få en generell betydelse för det fortsatta arbetet inom området. Som försöksobjekt har valts Birka Värmes kraftvärmeanläggning i Hässelby utanför Stockholm. Anläggningen som är en av de äldsta av sitt slag i Sverige har en drifttid i det intressanta intervallet.

### 3.1.2 Syfte

Syftet med undersökningen har varit att testa och utvärdera en av de befintliga metoderna för livslängdsanalys som kan användas för att bedöma och prognosticera investeringar i underhåll och byte av komponenter i en ångpanna. Ett annat syfte var att förutse risker för minskad tillgänglighet i egna energianläggningar. Olika enskilda försök görs redan av ett antal energibolag i Sverige och behov finns att utföra mer systematiska studier. Den samlade kunskapen i Finland är större än i Sverige och ett antal studier har redan utförts där. Information har inhämtats genom samarbetet med bland andra Birka Energi AB och Fortum OY i Finland.

### 3.1.3 Avgränsningar

Studien begränsas till Panna 2 i Hässelby där panna med eldstad, överhettare, ekonomiser, rökgasreningsanläggning och ångledningar ingår. Turbinanläggningen ingår inte i denna studie. Kvarnar, reglerutrustning och övrig kringutrustning är speciella för Hässelbyanläggningen och ingår inte heller i studien. Enbart mekaniska komponenter ingår.

### 3.1.4 Genomförande

Studien har indelats i två etapper. I den första etappen valdes en av de befintliga metoder för livslängdsanalyser ut och användes i en förstudie där tillgängliga uppgifter från komponenters drift och underhåll över en längre period studerades. Arbetet har utförts i nära samarbete mellan specialister från Fortum och Hässelbyverkets drift- och underhållspersonal. Rapporter och data har sammanställts

och ett urval av ingående komponenter och system har utförts på basis av de urvalskriterier som tagits fram. Experter inom t.ex. krypning och utmattning har rådfrågats under arbetet. De enskilda komponenterna har sedan studerats och ett detaljerat provningsprogram har utarbetats komponentvis eller för grupper av komponenter där typ av provning och provningsomfattning framgår.

I en senare fristående del (etapp 2), har provning utförts av komponenter enligt den provningsplan som föreslagits i etapp 1. Provningsplanen utfördes av specialister och provningsföretag licensierade för de aktuella metoderna. Etapp 2 mynnade sedan i en livslängdsanalys med en livslängdsprognos över nödvändiga investeringar i underhåll som skall utföras inom den närmaste tiden. Analysen baseras på utförda riskbedömningar och tillståndskontroll för komponenter och system.

Exempel på viktiga frågeställningar som ställdes inledningsvis var:

- Vilka kriterier skall användas för urval av komponenter?
- Vilka komponenter är aktuella?
- Hur skall komponenterna testas och inspekteras?
- Vilket tillstånd har komponenterna och hur stor är sannolikheten för haveri?
- Är den ekonomiska/tekniska livslängden uppnådd?
- Vilka investeringar skall prioriteras?

### 3.1.5 Metod för Hässelbyanläggningar

Traditionellt sett har investeringar i energianläggningar baserats på ett antal ekonomiska nyckelfaktorer från ett budgetarbete. Andra viktiga faktorer som plötsliga skador eller ny lagstiftning har också haft betydelse. I vissa fall kan även val av investering baserats på tillfälligt låga priser från en leverantör. Andra faktorer som statistik från skador eller ökad underhållskostnad har inte följts upp systematiskt och har därför inte heller kunnat medverka direkt som beslutsunderlag i investeringsprocessen. Det finns stor anledning att utvärdera effekten av en långsiktig åldring av systemen i anläggningen och att bedöma den inverkan som drift och underhåll har. Metoden som används för att utföra en livslängdsanalys måste involvera och engagera personalen på anläggningen så att en mer långsiktig planering av ekonomi och underhållsinsatser sker på alla nivåer i företaget. En annan viktig effekt är att personalen blir medveten om komponenternas tillstånd samtidigt som de lär sig att utvärdera och bedöma den.

Följande faktorer är viktiga för en livslängdsanalys och bör ingå i utvärderingen:

- Anläggningshistorik
- Anläggningsstrategi
- Driftdata
- Tillståndskontroll för komponenter/system
- Utvärderad haveririsk för komponenter och system
- Miljömässiga risker (yttre miljö)
- Haverikostnad
- Personrisk

Inom Värmeforsks forskningsprogram har ett antal metoder studerats och beskrivits, se **kapitel 1.3 i handbokens del 1**. I studien av Hässelbyanläggningen har vi valt Feleffektsanalys (på engelska Failure Mode and Effekt Analysis, FMEA) som bland annat beskrivs av Fritz (Fritz 1990). Metoden används för att välja kritiska

komponenter och lokalisering av kritiska ställen. I ett första steg identifieras de kritiska komponenterna utgående från:

1. sannolikhet för fel eller haveri
2. konsekvenser för enhetens produktion
3. kostnad och tid för reparation
4. säkerhetsfrågor

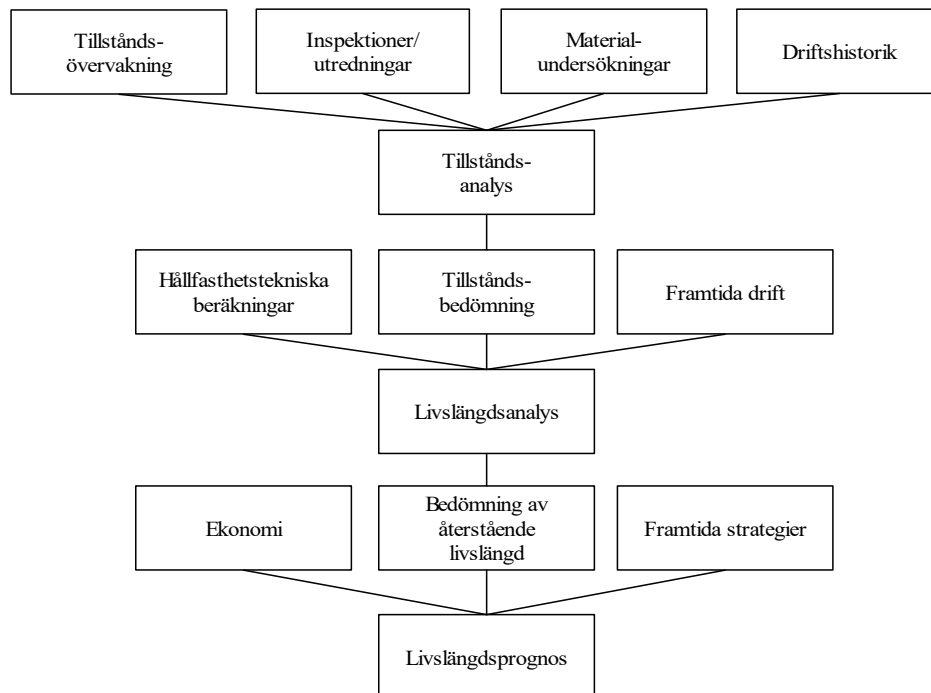
Varje faktor poängsätts från 1 till 5 för varje komponent. I detta sammanhang betyder en femma högst risk. Sedan multipliceras faktorerna och de som erhållit den högsta summan väljs ut för nästa steg där de kritiska punkterna väljs. De kritiska punkterna väljs med en liknande poängsättning. I denna poängsättning utgår man från:

1. arbetsspänning
2. arbetstemperatur
3. miljö för punkten
4. konstruktionsparametrar
5. kvalitet vid tillverkning

Varje faktor poängsätts från 1 till 5 för varje punkt. Sedan multipliceras faktorerna och de med den högsta summan väljs för analys.

En kort presentation av några andra metoder ges **handbokens del 1, kapitel 1.3** Program för att hantera åldring har också provats i Japan och på andra ställen (Shigera, House) Vårt val av Feleffektsanalys baseras på att metodiken är relativt enkel och därför lämplig att tillämpa på mindre ekonomiska enheter som värmeverk.

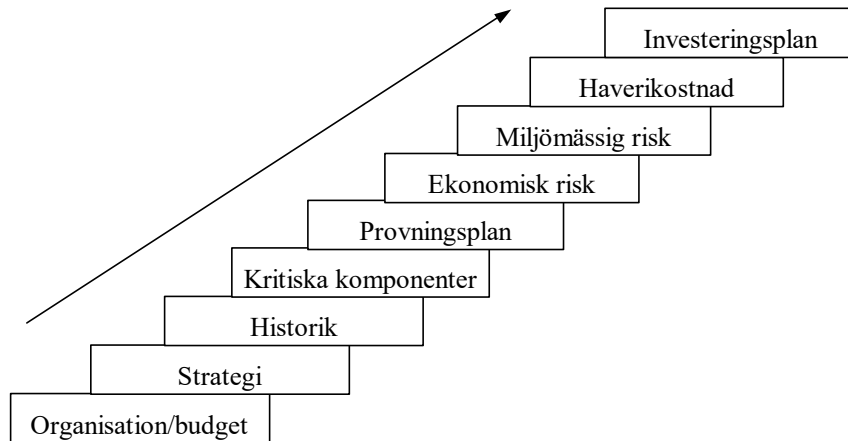
Processen för ett livslängdsarbete kan beskrivas enligt Figur 3.1-1.



**Figur 3.1-1** Definition av livslängdsarbete i energianläggning.

**Figure 3.1-1** Definition of life management in power plant.

De olika stegen i metodiken som tillämpats i detta projekt kan närmare beskrivas enligt Figur 3.1-2.



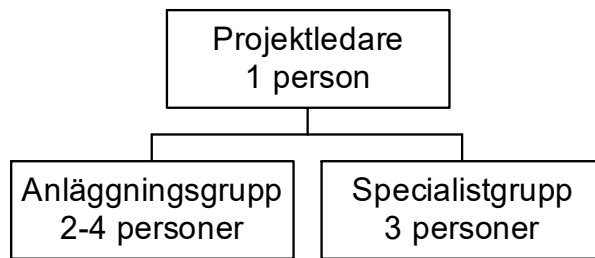
**Figur 3.1-2** Stegen vid denna livslängdsanalys.

**Figure 3.1-2** The steps of this lifetime analysis.

### 3.1.6 Organisation av arbetet

Det är viktigt att ha en bra organisation och planering av arbetet under en livslängdsanalys. Arbetet i studien organiserades i två arbetsgrupper med en gemensam projektledare. Projektledarens roll var att hela tiden styra arbetet. Han var också ansvarig för projektet inför beställaren. Han måste dessutom vara kunnig på metoden, kunna utbilda personerna i grupperna och samordna arbetet tekniskt och organisatoriskt. En av arbetsgrupperna bestod av personer från anläggningen med huvuduppgift att ta fram drifthistorik och bakgrundsdata och intervjua driftpersonal. Den andra gruppen bestod av specialister med metallurgisk och hållfasthetsteknisk bakgrund som specialiserat sig på krypskador, utmattning och andra åldringsfenomen. Huvuduppgiften för specialistgruppen var att utvärdera drifthistorik och data från komponenter och system och att föreslå kompletterande tillståndskontroller för att kunna göra en bedömning. De två grupperna arbetade relativt oberoende av varandra med olika rapporteringstillfällen och verksamhetsmål. Anläggningsgruppen behövde emellertid stöd av specialisterna för att kunna sortera ut viktiga data ur drifthistorik och anteckningar från intervjuerna. Grupperna hade ett antal möten då material från förstudien jämfördes och kompletterades. Det visade sig att materialet var relativt omfattande med ett 20-tal utredningar med bilagor och kommentarer. Båda grupperna fick presentera rapporter med sammanställningar och register över materialet. Projektledarens roll var inte bara att kontrollera tid/kostnader på ett liknande sätt som i ett normalt utförandeprojekt utan innehåller även ett tekniskt inriktat ledarskap för att i grupperna tydliggöra metodiken i varje steg i projektet och att leda de tekniska diskussionerna mellan grupperna.

Organisationens bemanning framgår av Figur 3.1-3.



**Figur 3.1-3** Bemanningsplan

**Figure 3.1-3** Organization flow chart

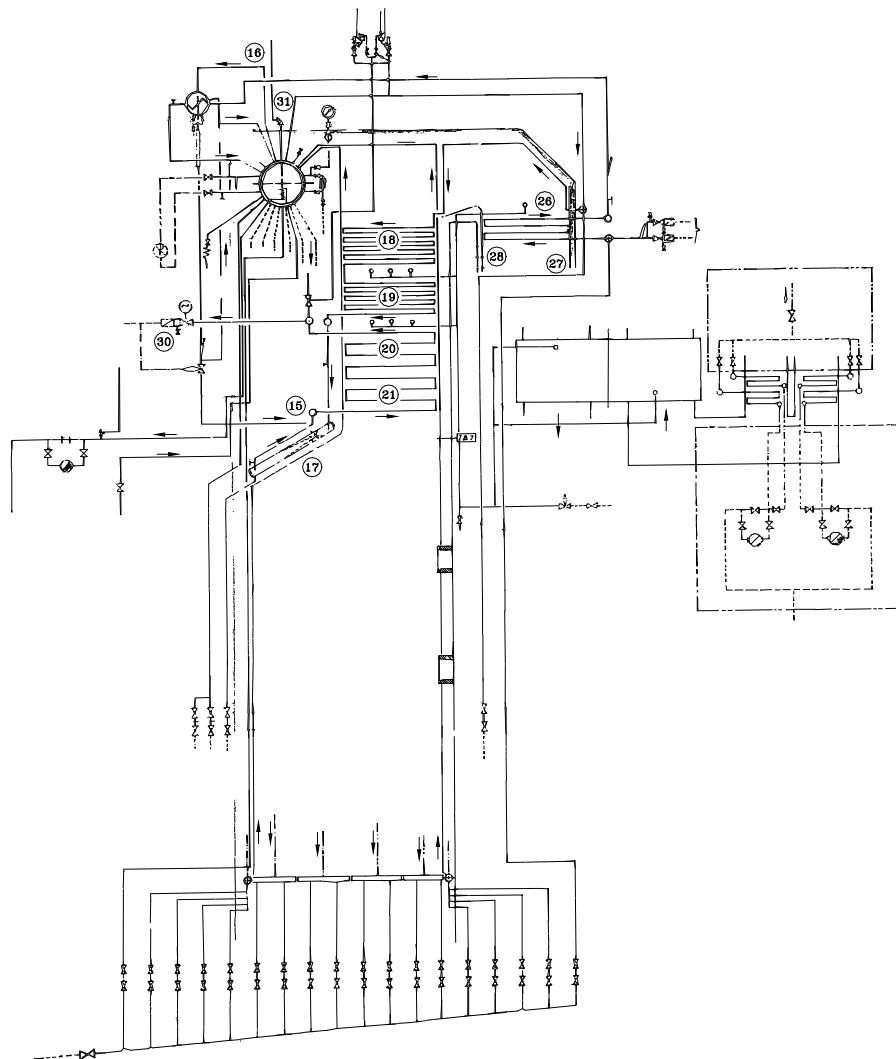
### 3.1.7 Strategi för försöksanläggningar

Hässelbyanläggningen planeras att i framtiden drivas som en baslastanläggning under mer än 20 år. Strategin för anläggningens underhåll är att bibehålla en konstant och hög status enligt nuvarande nivå och att prioritera "vardags"-investeringar som att byta ut förbrukad utrustning mot ny med liknande prestanda. Inga stora investeringar som nya pannor planeras. Livslängdsanalysens tidsintervall spänner över ett tidsperspektiv av 10 år under vilken en optimering av investeringar i underhåll och utbyten av komponenter skall planeras.

### 3.1.8 Anläggningsdata

Som försöksanläggning i studien har valts Hässelbyanläggningen. Anläggningen som är ett kraftvärmeverk, består av tre pulvereldade pannor som togs i drift 1959. Pannorna har en total bränsleeffekt på 320 MW. Värmeeffekt uppgår till 200 MW och eleffekt är 75 MW. Anläggningen dimensionerades ursprungligen av Svenska Maskinverken för olja med kol som reservbränsle. Från 1982 var anläggningen kolbränslebaserad och 1993 ersattes kolet med en mix av biobränsle och olja där bioandelen idag uppgår till ca 75-80 %. Man använder ett peletterat trädbränsle som mals före tillförsel och förbränning i pannorna. Biopulver och olja tillförs i en gemensam pulverbrännare med en oljelans i centrum. Pannorna var designade för en drifttid på 100.000 h men har varit i drift under mer än 140.000 h (31/12 1998).

En generell layout av pannan framgår av Figur 3.1-4. I Tabell 3.1-1 listas de väsentliga komponenterna i pannan. Vissa av komponenterna är markerade i figuren.



Figur 3.1-4 Vertikalt tvärsnitt av panna 2.  
Figure 3.1-4 Vertical cross section of boiler 2.

Tabell 3.1-1 Väsentliga komponenter i den undersökta pannan.

| <b>Nummer i Fig 3.1-4 /Komponent *</b> |                        |                       |                            |
|----------------------------------------|------------------------|-----------------------|----------------------------|
| 1. Pannstativ                          | 11. Undre frontvägg    | <b>Väggöppningar</b>  | <b>Yttre delar</b>         |
| 2. Ångdom                              | 12. Undre sidovägg     | 22. Brännareöppningar | 31. Säkerhetsventiler      |
| 3. Fallrör                             | 13. Taktuber           | 23. Inspektionsluckor | 32. Säkerhetsventiler      |
| <b>Bottenlådor</b>                     | 14. Bottentuber, sneda | 24. Sotblåsare        | 33. Asbetsisolering        |
| 4. Bakvägg                             | 15. Övre samlingslåda  | 25. Luftportar        | 34. Tätplåt (gastät)       |
| 5. Frontvägg                           | 16. Dolezalkylare      | <b>Ekonomiser</b>     | 35. Brännare               |
| 6. Sidoväggar                          | 17. Ångkylare          | 26. Varma delen       | <b>Yttre rökgassystem</b>  |
| <b>Vägguber</b>                        | <b>Överhettare</b>     | 27. Kalla delen       | 36. Rökgaskanal (inre)     |
| 7. Övre bakvägg                        | 18. Övre ÖH1           | 28. Väggar            | 37. Luftförvärmare (luft)  |
| 8. Övre frontväg                       | 19 Undre ÖH1           | 29. Ekobalkar         | 38. Ljungströms-förvärmare |
| 9. Övre sidoväggar                     | 20. Övre ÖH 2          | 30. Armatyr           | 39. Rökgasfläktar          |
| 10. Undre bakvägg                      | 21. Undre ÖH 2         |                       | 40. Askutmattnig           |

\* OBS alla komponenterna i tabellen är inte markerade i Figur 3.1-4.

### 3.1.9 Förstudie

Analysen inleddes med en omfattande sammanställning av driftdata och rapportering från anläggningen. Materialet omfattade bland annat:

1. Statistik om avvikelser från normala driftbetingelser.
2. Uppgifter om större reparationer eller ombyggnader.
3. Utförda statusbedömningar och andra utredningar.
4. Rapporter från haverier under drift på överhettare, ekotuber etc.
5. Inspektionsrapporter från ackrediterade provnings- och inspektionsföretag.
6. Loggböcker med allmänna driftdata.
7. Intervjuer med driftansvariga för ytterligare data.

Utvärdering av kritiska komponenter och haveririsk för de olika system som ingick i studien baserades på praktiska och teoretiska kunskaper om anläggningen. I förstudien har data från underhållsprogram, felrapporter och iakttagelser från inspektioner inhämtats. Även de senaste rönen från FoU-rapporter och kunskaper från specialister har beaktats i arbetet.

På basis av förstudien har en lista på kritiska komponenter tagits fram av anläggningsgruppen, i samarbete med drift- och underhållspersonal från verket. Exempel på kriterier är:



- Hög sannolikhet för incidenter.
- Stor effekt på anläggningens ekonomi.
- Hög kostnad vid haveri.
- Stor risk för personskada vid haveri.
- Stor miljömässig belastning på omgivningen.

Baserat på urvalskriterierna valdes ett 50 tal kritiska komponenter vilka ingår i en provningsplan som syftar till att bestämma tillståndet på komponenterna och möjliggöra en bedömning av återstående livslängd och investeringsbehov för anläggningen.

### 3.1.10 Sammanställning av historik

Det är viktigt att utföra en noggrann analys av de transienter med medföljande utmattningspåkänningar som har förekommit i anläggningen. Det mesta av basdata finns att hämta i driftprotokoll och loggböcker från anläggningsarkivet. Det visade sig emellertid att de data som fanns upptagna inte alltid var relevanta för utredningsarbetet. Mindre händelser och transienter som kunde vara viktiga för åldrandet av system och komponenter fanns inte alltid nedtecknade utan kunde lätt förbises. För att fånga upp dessa data utfördes ett antal intervjuer med driftpersonal som tjänstgjort under de aktuella tillfällena. En hel del nya uppgifter har då framkommit som är inkluderat i studien. Inför arbetet i förstudien sammanställdes en checklista över väsentliga data som skulle ingå i uppföljningen av historik. Listan kan ses nedan.

#### Checklista för frågor

*Beskrivning av anläggningen:*

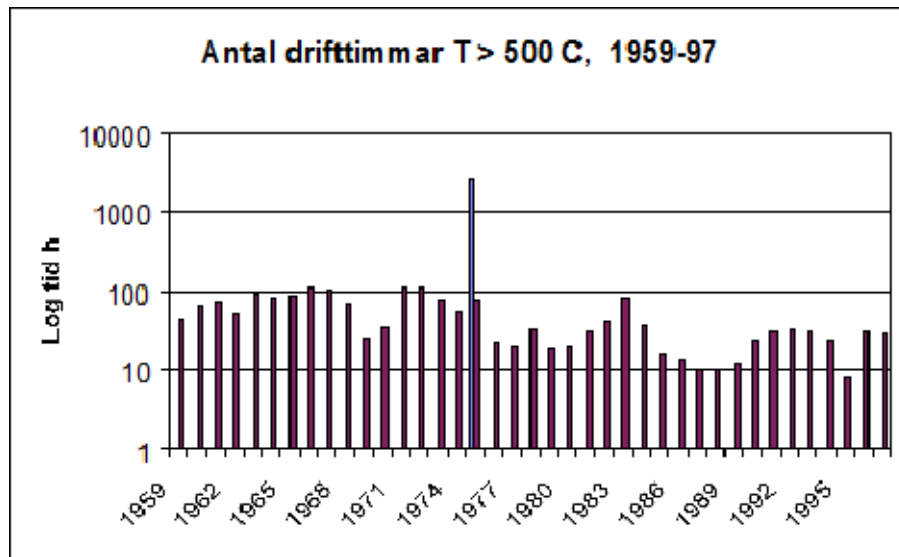
- 1 Drifthistorik
  - a) Drifttemperatur  $f(t)$
  - b) Drifttryck  $f(t)$
  - c) Antal starter per år
  - d) Start/stopp förlopp, instruktion, ändringar under åren
- 2 Stora haverier
  - a) Antal
  - b) Komponenter
  - c) Åtgärder
  - d) Orsaksutredningar
  - e) Uppföljning
- 3 Mindre haverier
  - a) Antal
  - b) Komponenter
  - c) Åtgärder
  - d) Orsaksutredningar
  - e) Uppföljning
- 4 Rutinmässiga undersökningar
  - a) Komponenter
  - b) Intervall
  - c) Metod
  - d) Sammanställning av resultat

- e) Åtgärder
- f) Uppföljning
- 5 Ombyggnader
  - a) Nya driftdata
  - b) Orsak
- 6 Bränslebyten
  - a) Orsak
  - b) Konsekvenser
  - c) Ombyggnad
  - d) Uppföljning

### 3.1.11 Drift- och provningshistorik

Anläggningen drevs med moderata ångdata fram till 1967. Under 1968 ökades värdena till nivåer nära designdata (520 °C, 7 MPa) utgående ånga. År 1972 introducerades kol som bränsle vilket medförde återigen sänkta ångdata. Under 1975 löstes de problem som föranledde sänkningen och anläggningen uppnådde åter designvärden. Den enda allvarliga skada som inträffat var rapporterad från februari 1976 då en ånglåda exploderade i överhettaren. En undersökning visade att skadan orsakades av en materialöverhettning på grund av att stråkbildning med heta rökgaser bildades i pannan genom beläggningar i överhettaren. För att förhindra att liknande skador skulle återuppträffa installerades en förbättrad övervakning av ångtemperaturen genom att temperaturen kunde övervakas på enskilda överhettarskärmar. Antalet överhettarskärmar minskades också genom gallring för att minska överhettningen av ångan. En gräns på maximalt 500 °C ångtemperatur bestämdes för att ytterligare minska sannolikheten för nya skador. Under 1999 har antalet skärmar återställts till sitt ursprungliga antal. Frånsett rapporten från den havererade ånglådan har inga ytterligare allvarliga skador rapporterats från tryckkärlen. Ett undantag är att ett antal havererade fixturer mellan eldstadstuber och tätplåten. Väggtuberna är uppbyggda med så kallad "skin-casing" teknik. Skadorna har uppstått sekundärt genom att aska har byggts upp bakom tuberna som har böjts in mot eldstaden och skadat fixturerna. Skadorna har successivt åtgärdats genom en modifierad fixtur. Ett antal tuber har också bytts ut efter en förtunning vid brännaröppningarna. Tuberna har påverkats av erosion från partiklar i förbränningen.

Drifthistoriken är sammanställd i **Bilaga 3.1-1**. Figur 3.1-5 visar antalet drifttimmar vid ångtemperaturer över 500 °C från sammanställningen. Det sammanlagda antalet är ungefär 20 000 h. En intressant iakttagelse som kan göras är att trots det relativt låga totala antalet drifttimmar vid temperaturer över 500 °C, så påträffades signifikanta krypskador vid provningen av ångsystemet. Den allmänna uppfattningen har tidigare varit att krypskador bör vara sällsynta i fall av aktuella drifttider under 500°C och så pass korta drifttider med temperaturer från 500°C upp till designtemperaturen som i det här fallet är 520 °C.

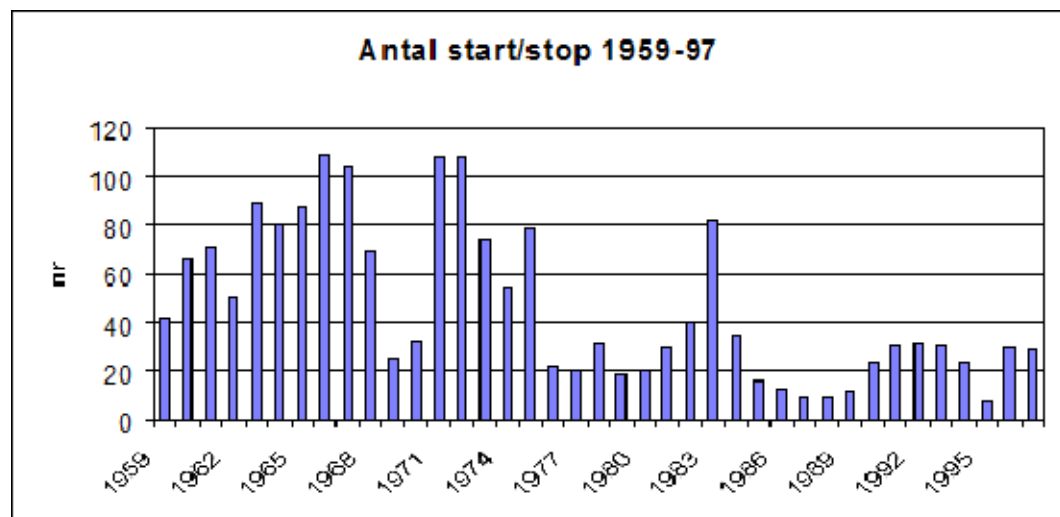


Figur 3.1-5 Antal drifttimmar vid temperaturer över 500 oC.

Figure 3.1-5 Number of hours at temperatures above 500 oC.

Det framgår av Figur 3.1-6 att antalet start/stop var relativt högt i början av driften. Det var ett resultat av att nätlasten till en början var låg innan nätet var fullt utbyggt. Under de sista 25 årens drift har antalet start/stop-tillfällen avtagit. Det ackumulerade antalet start/stop-cykler på ungefär 1800 st är relativt stort vilket bör avspeglas i en ökande risk för utmattningsbetingade skador. Hittills har emellertid frekvensen av sådana skador varit låg.

Skadeeffekter av övergång till eldning med träbränsle har inte kunnat påvisas efter sex års drift.



Figur3.1- 6 Antal start/stop mellan 1959-97.

Figure 3.1-6 Number of start/stop between 1959-97

Utförda provningar av Hässelby panna 2 finns rapporterade i **Bilagor 3.1-2** och **3.1-3**. Det framgår till exempel att på mitten av 1980-talet replikprovades ett T-stycke och några rörböjar inklusive ett par fogar till högtrycksångssystemet. På 1990-talet är de enda rapporterade replikprovningarna utförda på ångkylaren samt på böjarna till högtrycksångssystemet.

Årligen återkommande underhållsmässiga provningar av godstjocklek och tubprover av panntuber har rapporterats.

På basen av dessa uppgifter finns ingen kännedom om eventuell befintlig skadeutveckling i följande komponenter:

- Dolezalkylaren (korrosion, sprickbildning med läckage som följd)
- Ångdomen
- Överhettare 2 samt samlingslådor
- Formstycket som sammanför ångan till ångledning
- Ångledningen i de delar som beräknats vara högst belastade enligt en statisk spänningsanalys utförd 1986

### 3.1.12 Kritiska komponenter

Utvärdering av kritiska komponenter för de olika systemen utfördes genom en kombination av tillämpad kunskap, data från underhållssystem, rapporterade fel och anmärkningar från inspektionsrapporter och provningsprotokoll. Anläggningsgruppen sammanställde en lista över komponenter som ingår i undersökningen. Erfarenhet från drift och underhåll ingår i underlaget för att sammanställa listan och arbetet resulterade i ett 60-tal komponenter som togs ut för ytterligare analyser av grupperna. Hela listan framgår av **Bilaga 3.1-4.1/3.1-4.2**. Generellt har följande kriterier används för en djupare riskanalys av dessa komponenter.

- Hög sannolikhet för skador
- Stor inverkan på anläggningens ekonomi
- Stor personskadekonsekvens
- Inflytande på yttre miljö

De första 4 komponenterna i listan framgår av Tabell 3.1-2 nedan där de är poängsatta i en skala från 1 till 5 för olika riskfaktorer. Ett högt värde betyder en hög risk för skador.

**Tabell 3.1-2. Riskfaktorer för kritiska komponenter, utdrag ur Bilaga 3.1-5.**

|                      | A           | B               | C                | D                         | E                         | F   | G               | H       | I           | J    |                   |
|----------------------|-------------|-----------------|------------------|---------------------------|---------------------------|-----|-----------------|---------|-------------|------|-------------------|
| Komponentgrupp       | Arbets temp | Arbets spänning | Wigo för punkten | Konstruktion s parametrar | Kvalitet vid tillverkning |     | Person säkerhet | Ekonomi | Yttre miljö |      | KRITISK KOMPONENT |
| Ångpanna             |             |                 |                  |                           |                           |     |                 |         |             |      |                   |
| Högtrycksförbrännare | 3           | 3               | 3                | 4                         | 1                         | 108 | 5               | 4       | 1           | 2160 | Hög               |
| Ångledar             | 3           | 3               | 2                | 3                         | 1                         | 54  | 4               | 5       | 1           | 1080 | Medel             |
| Ångledningsledning   | 2           | 2               | 2                | 2                         | 1                         | 16  | 3               | 2       | 1           | 96   | Låg               |
| Ekonomisk analys     | 3           | 3               | 4                | 2                         | 1                         | 72  | 1               | 2       | 1           | 144  | Låg               |

### 3.1.13 Definition av riskfaktorer

I det följande definieras de riskfaktorer som använts (med beteckningar A-J i överensstämmelse med Tabell 3.1-2). Efter definitionen ges inom parentes exempel på vad som kan ge höga faktorer.

|             |     |                                                                                                                                         |
|-------------|-----|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Temp        | (A) | Temperatur vid mätpunkten relativt designtemperaturen<br>(En låg grad av temperaturkontroll ger en hög faktor)                          |
| Spänning    | (B) | Spänning vid mätpunkten relativt design värde<br>(Spänningstransienter i domen ger en hög faktor)                                       |
| Miljö       | (C) | Miljö vid mätpunkten (processmedia) relativt designvärde<br>(Stillastående vatten med höga kloridhalter ger en hög faktor)              |
| Design      | (D) | Design relativt nuvarande driftförhållande<br>(En böjspänning från en skarp svetsövergång ger en hög faktor)                            |
| Kvalitet    | (E) | Uppnådd kvalitet relativt design<br>(En låg kvalitet vid tillverkning ökar skaderisken för en ångkylare)                                |
| Produkt     | (F) | Produkten $F = A*B*C*D*E$                                                                                                               |
| Säkerhet    | (G) | Personsäkerhet<br>(En ånglåda ger en hög risk för utläckande ånga och en stor personskadekonsekvens)                                    |
| Kostnad.    | (H) | Kostnad för haveri inkluderande produktionsförluster, utbyteskostnad m m<br>(Kostnaden sätts i relation till merproduktionskostnaderna) |
| Yttre miljö | (I) | Effekt på yttre miljön vid skador/läckage av media                                                                                      |
| Produkt     | (J) | Produkten $J = F*G*H*I$                                                                                                                 |
| Poäng       |     | A-E och G-I sätts mellan 1-5. Ett högt värde betyder en hög risk för skador.                                                            |

| Relativa risknivåer | Definition                        |
|---------------------|-----------------------------------|
| Hög risk            | $F > 100$ <b>och</b> $J > 1000$   |
| Medelhög risk       | $F > 100$ <b>eller</b> $J > 1000$ |
| Låg risk            | $F < 100$ <b>och</b> $J < 1000$   |

Genom att sätta nivåerna för hög/medel/låg risk enligt ovan uppnåddes en fördelning av komponenter på de olika risknivåerna av ungefär 25%/50%/25% för respektive nivå. Vid andra bedömningar och analyser kan emellertid andra fördelningar av risknivåer bli aktuella beroende på den aktuella situationen i anläggningen. Det är dock viktigt att tänka på att använda enkla och lättförståeliga bedömningsgrunder för att underlätta arbetet för anläggningsgruppen.

Av tabellen i Bilaga 3.1-4.1/3.1-4.2 framgår att ett tiotal komponenter har klassats som högriskkomponenter. Av dessa har ångkylaren och ångsystemet bedömts ha de högsta haveririskerna. Det har främst baserats på att ett haveri av dessa komponenter innebär mycket stora personella risker. De flesta komponenterna från listan har analyserats vidare och ingår i den fortsatta analysen och i provningsplanen för tillståndskontroll.

### 3.1.14 Provningsplan

Provningsplanen har två syften. För det första utgör den ett förslag till tillståndsbedömning sommaren 1999, och för det andra en bas för ett fortlöpande provningsprogram för de kommande åren. Antagandet har varit att planen sträcker sig 10 år i framtiden. Denna preliminära provningsplan bör uppdateras efter utförd statusbedömning. Uppdateringen ingår inte i detta arbete.

**Bilagorna 3.1-2 och 3.1-3** innehåller ett sammandrag av den inspektionshistorik som var tillgänglig för uträttandet av detta arbete. Denna historik baseras närmast på uppgifter från det material som anläggningsgruppen har tagit fram i förstudien.

Provningsplanen är bifogad i **Bilagorna 3.1-5 och 3.1-6** till rapporten. Tabellerna inkluderar en uppräknings av potentiella skademekanismer för respektive komponent, tidpunkter för provningen och de provningsmetoder som planeras att användas vid varje tidpunkt.

Generellt sett innefattar de uppräknade skadeformerna belastningar/skadebildningar på innerytor av komponenten i fråga. Detta gäller i de flesta fall korrosion, erosion och utmattning. En del av komponenterna utsätts även för utvändiga skadeformer såsom högtemperaturkorrosion, askerosion av eldstadstuber och sotblåsarerosion av områden nära sotblåsare. Även krypning är en skadeform som kan upptäckas utvändigt i många fall.

Inför valet av provningsmetoder för de kritiska komponenterna är det lämpligt att ställa ett antal vägledande kontrollfrågor:

- Varför provas komponenterna?
- Vilka kriterier och mål har provningen?

Provningsplanen kan ses som en åtgärd med vilken man uppnår olika mål. Dessa mål kan vara av mer eller mindre praktisk och realistisk karaktär. I praktiken kan uppgivna orsaker för utförande av oförstörande (förstörande) provning vara att:

- Tillfredsställa myndigheternas krav.
- Dessa provningar har rekommenderats av ackrediterade provningsföretag.
- Anläggningsägaren vill göra en tillståndsbedömning av denna komponent / detta system.
- Kunna svara på frågan om hur länge kan denna komponent användas med bibehållna miljö- och säkerhetskrav.

Det slutliga målet för utförande av oförstörande och förstörande provning är, eller bör vara att säkerställa driften under nästa driftsperiod samt samtidigt ge tekniskt underlag för beslut angående eventuella reparationer eller utbyten på kort, medellång eller lång sikt. Skalan för vad som anses vara kort eller långsiktig planering bör sättas enligt de lokala förhållandena, där driftssättet och ekonomiska randvillkor är införlivade.

Provningsåtgärderna och deras omfattning bör därför prioriteras efter en första analys där de kritiska komponenterna har sällats fram (förstudien). Åtgärderna koncentreras därefter i huvudsak till dessa kritiska komponenter. Dels är målet att i första hand ge en kontinuerlig insikt i de kritiska komponenternas mekaniska tillstånd. I andra hand är målet att ge ett underlag för analyser av eventuell skadeutveckling i övriga komponenter, som bedömts vara mindre riskfyllda, med beaktande av bl.a. miljö-, säkerhets- samt driftstekniska skäl. Det är viktigt att bedömningen av komponenter

mynnar i ett numeriskt värde på deras tillstånd som sedan kan användas för uppskattning och kvantifiering av haveririskerna i den fortsatta analysen. För de kritiska komponenternas del kan rekommenderas att en uppdatering av tillståndet görs årligen med provning enligt provplanen.

Provningsplanen bör även den uppdateras med jämna mellanrum, i ca 2-3 års perioder parallellt med uppdateringen av de kritiska komponenternas tillstånd. I praktiken betyder uppdateringen att man kontrollerar de komponenter som provats sedan senaste uppdatering och jämför eventuell skadeutveckling med tidigare resultat. Till sist analyseras uppgifterna för att leda till beslut ifall vidare åtgärder behövs och provningsplanen kan då justeras vid behov.

Filosofin med provningsplanen utgår ifrån att nästan alla komponenter undersöks med varierande noggrannhet under en viss tidsperiod, t.ex. 8-10 år. Detta innebär att provningen är "roterande" efter en inledande statusbedömning med tillhörande analys av resultaten. Dessutom är det ekonomiskt att värdera driftdata för att avgöra relevanta provningsmetoder och provningsomfattningar, för att undvika onödig eller icke ändamålsenlig provning.

Under utförandet av en provningsplan bör följande uppgifter beaktas:

1. Driftsdata (temperatur, tryck samt variationer)
2. Dimensioner
3. Tidigare utförda reparationer och eventuella utbyten, samt orsak till dessa
4. Tidigare utförda underhållsåtgärder
5. Utförda spännings- och andra belastningsanalyser i kombination med driftsdata
6. Tidigare utförda provningar och deras resultat

Från driftsdata är det möjligt att uppskatta om systemen har fungerat enligt planerna, eller om designvärdena har under- eller överskridits. Precisionen i uppskattningarna är beroende av kvaliteten av mätningarna. Dimensionerna är viktiga för att kunna jämföra med tillåten belastning samt för att kunna jämföra mätresultat med ursprungliga dimensioner. Förutom att utförda reparationer och utbyten pekar på vilka komponenter som uppenbarligen är hårt belastade kan man grovt uppskatta deras skadeomfattning på basen av reparations- eller utbytesfrekvens. Samtidigt får man en uppfattning om vad som är att förvänta och kan välja korrekt metod för provningen. Som ett exempel kan nämnas att periodvis gjorda justeringar av upphängare för ångledningar eller andra komponenter (speciellt sådana som dimensionerats för krypning) kan indikera felaktigt design- eller inställningsvärde, vilket speglar sig i att ångledningen kontinuerligt förflyttas. Detta kan åtgärdas genom att dimensionera upphängarna på nytt. En spänningsanalys ger inte nödvändigtvis tillräcklig insikt i detta problem, beroende på ångledningens flexibilitet.

Tidigare utförda provningars värde beror till en del på hur länge sedan provningen är gjord, samt vad man för övrigt vet om komponenten och dess belastningar sedan senast. Dokumentering av utförda provningar underlättar bildandet av en helhetsbild av det allmänna tillståndet i systemen ifråga.

Nedan följer några exempel på överväganden av vilken provning som är relevant:

- För utvärdering av inre beläggningar i överhettartuber och eldstadsväggar kan ultraljudsprovning genomföras. Beläggningar överstigande 200 µm kan upptäckas utan specialiserad utrustning.



- Replikprovning borde utföras på samlingslådan till ÖH2 samt formstycket och ångledningen då dessa är de enda komponenter som normalt drives i temperaturer där krypning är en betydande faktor. I panntuber till ÖH 1 kan dimensionsmätningar med hjälp av ovalitetsmätningar med hjälp av ett fast mått (t.ex. en gaffel) vara framgångsrika, då speciellt i den hetare delen.
- Beroende på syrehalten i matarvattnet under underhållsstopp är lokal syrebetingad korrosion tillsammans med kopparn en eventuell orsak till tubläckage, samt för korrosionsskador i Dolezal-kylaren.

I **Bilaga 3.1-5** har potentiella skademekanismer sammanställts i den första kolumnen, som en indikering av driftsbetingelserna. Själva provningsprogrammet består av de följande kolumnerna. Programmet är koncentrerat till de trycksatta komponenter i pannan, som inte anses ingå i normala underhållsåtgärder, såsom vägg tuber och andra ytor utsatta för rökgasernas påverkan. Varje år representerar en kolumn. Förutsättningarna som använts för framställningen av detta programförslag är följande:

- Ingen kunskap om vissa delar (se ovan).
- Andra delar inspekterade men inte ånyo trots rekommendation (se ovan).
- Resultat av utförda spänningsanalyser (se ovan).
- Årligen återkommande underhållsmässiga åtaganden görs i alla fall (tjockleksmätningar samt visuell provning av vägg tuber i pannan etc.).
- Inom pannan utgör det föreslagna programmet en bas för kommande år
- Ångledningen provas "stickprovsmässigt" och vissa delar provas roterande i fortsättningen. Utgångspunkten är att långt framskriden krypning inte kan konstateras under tillståndsbedömningen.
- Driftsförhållanden (första kolumnen, potentiella skademekanismer) bestämmer provningsmetod. Provningsintervallet bestäms under antagande att driftsförhållanden inte förändras.

### 3.1.15 Riskbaserade inspektioner

Inspektionen av komponenter och system i en anläggning baseras oftast på subjektiva bedömningar av drift och underhållspersonal. I vissa anläggningar har man dock styrt mot ett mer tillståndsbaserat underhåll genom en kombination av olika provningsmetoder och mätningar. Trots detta kräver den nuvarande snabba förändringen på marknaden en förändring mot mer riskbaserat underhåll av anläggningarna. Den dominerande situationen idag är att genom ronderingar under drift och erfarenheter vid underhållsåtgärder så skapas en erfarenhet hos personalen vid anläggningen som sedan tjänar som bas för planerade inspektioner och underhållsåtgärder vid driftuppehållen.

Genom att tillgång på olika typer av feldata i regel är mycket begränsad blir risken för skador och haverier i dagens situation inte analyserat på ett systematiskt och metodiskt vis. Det finns därför en uppenbar risk att felbedömningar görs vid planering av de årliga investeringarna i underhåll och utbyte av komponenter. Det finns dessutom en uppenbar risk att nyckelpersoner är frånvarande eller sjuka vid kritiska tidpunkter i planeringen. De mest uppenbara investeringarna kan då bli högre prioriterade på bekostnad av de mer strategiska vilket kan medföra att såväl drift som underhållskostnaderna kan öka. För att förbättra möjligheterna pågår för närvarande en intensiv utveckling i både Sverige och övriga världen från de traditionella årliga erfarenhetsbaserade inspektionerna mot riskbaserade inspektioner i både kraftverk och

andra industrianläggningar (Fisher 1999). Genom den nya tekniken kan ökad säkerhet, tillgänglighet och minskade kostnader uppnås. Förklaringen är enligt dessa källor att inspektionerna fokuseras på komponenter med största haveririsken och att onödiga utbyten undviks.

Risken i detta sammanhang är ett uttryck för hur faran med ett haveri och oplanerat stopp av anläggningen påverkar den yttre miljön, personsäkerheten eller anläggningens totala ekonomi. Risken kan med en sådan definition uttryckas som:

Risk = Sannolikhet x Konsekvens

En omfattande beskrivning av riskbaserade inspektioner (RBI) ges i kapitel 1.9 i handbokens del 1. Utöver att identifiera kritiska system och komponenter ingår i RBI-konceptet att identifiera hur och när de kritiska systemen eller komponenterna ska undersökas. I undersökningen har en riskbaserad inspektion utförts på alla hög- och medelriskkomponenter. Omfattningen framgår av **Bilagorna 3.1-5 och 3.1-6**. Materialexperten som har ingått i arbetsgruppen har valt provningsteknik och omfattning av provningen. Typ av provning har baserats på den förväntade skademekanismen för respektive komponent eller system som skall undersökas. De olika mekanismerna ges i **Bilagorna 3.1-5 och 3.1-6**.

Tillståndet för de olika komponenterna har bedömts utifrån resultatet av inspektionerna. Som bedömningsgrund har en 5-gradig skala använts. I Tabell 3.1-3 ges en väletablerad 5-gradig skala som används för att bedöma krypskador. Denna har tillämpats vid undersökningar på de kryppåkända komponenterna. En 5-gradig skala har också använts för bedömning av alla andra förekommande skademekanismer som allmän korrosion och utmattnings. Det har ännu inte kunnat etableras allmänt tillämpade definitioner för klassificering av skadan i dessa fall. Skadeindelningen är således helt grundad på specialistgruppens kunskaper och erfarenheter.

Nedan följer exempel på provmetoder i pannan och på Ångledningarna. Provmeter som ej anges nedan är angivna i tabellerna i **Bilagorna 3.1-5 och 3.1-6**.

#### *Pannan*

- Dolezalkylaren undersöks så fullständigt som möjligt.
- Fallrörens nedre böjar undersöks med tanke på eventuell erosion i slutdelen av den nedersta böjen (partikelerosion eller vattendroppserosion).
- Utmärkta samlingslådor samt ÖH2 fördelarlåda undersöks invändigt med endoskopi till 100 % samt utvändigt med magnetpulverprovning.
- Ångdomen antas ingå i den officiella provningen, därav inom parentes.
- Ångkylarens mantel samt infästningar undersöks invändigt med endoskopi och svetsfogarna undersöks utvändigt med magnetpulverprovning.
- Svetsfogar på samlingslådan till ÖH2 provas till ca 50 % i utsatta delar (bestäms enligt temperaturdistribution över lådan). Lådans mikrostruktur samt hårdhet utvärderas på 3-6 ställen.
- Panntuber till ÖH2 undersöks med hjälp av tubprov från 2 ställen i laboratorium. Undersökningen gäller mikrostruktur, godstjocklek, hårdhet samt beläggningstjocklek.
- Böjar samt en fog i vardera ledningen mellan ÖH2 samlarlåda och formstycket undersöks.
- Formstyckets (märkt F1 Bilaga 3.1-5) båda inkommande ledningars fogar samt eventuell "fabriksfog" undersöks.

### Ångledningen

- Fogarna vid V1 undersöks (efter formstycket).
- Vid varje böj som undersöks inkluderas själva böjen samt en fog (den som är närmare böjen).
- I T-stycket undersöks fogarna samt övergångarna från rördimension till T-styckets dimension. Dessutom eventuell dräneringspunkt invändigt med endoskopi.
- Ångledningens anslutning till turbinen undersöks (inklusive flänsens fog).
- Magnetpartikelprovning utföres normalt på rengjord yta, replikprovning utföres på ytterytan.

Vad gäller replikprovning är tid till följande inspektion uppskattade enligt sambanden mellan krypskada och ett tillräckligt säkert inspektionsintervall i Tabell 3.1-3.

**Tabell 3.1-3. Bedömning av tillståndet hos kryppåkända komponenter (Neubauer 1981).**

| Klass | Grad av skada          | Tid till nästa inspektion eller annan åtgärd |                 |
|-------|------------------------|----------------------------------------------|-----------------|
|       |                        | Rörböj                                       | Annan komponent |
| 1     | Inga skador            |                                              |                 |
| 2     | Separata krypkaviteter | 3-5 år                                       | 3-5 år          |
| 3     | Stråk av krypkaviteter | 1-2 år                                       | 1-2 år          |
| 4     | Mikrosprickor (< 2 mm) | Max ½ år                                     | Max 1 år        |
| 5     | Makrosprickor          | Byte                                         | Reparation      |

Ett år antas innehålla ca 7000 drifttimmar. Exempel: Vid krypskada av klass 2 bör följande inspektion göras inom intervallen 21 000 - 35 000 drifttimmar från föregående inspektion.

Resultaten av tillståndsbedömningarna på pannan och ångledningen ges i Bilagorna 3.1-7 respektive 3.1-8. Några av komponenterna i pannan är bedömda till grad 4 på den femgradiga skalan och bör ägnas stor uppmärksamhet. På undersökta delar av ångledningarna var tillståndet i allmänhet gott. De flesta delarna var skadefria men några positioner hade skador med begränsad utveckling.

#### 3.1.16 Riskbaserade investeringar

Alla investeringar som planeras i en anläggning kan relateras till åtgärder på system och komponenter där man kan identifiera ett begränsat antal kritiska komponenter med en definierbar risknivå. Utvärderingen av risk för de planerade investeringarna kan då baseras på sannolikheten av den konsekvens som blir resultatet av att åtgärden inte utförs. Frågan som skall ställas kan formuleras som "Vad kommer att inträffa om inte investeringsprojektet utförs i anläggningen" och vad blir konsekvensen av ett haveri på komponenten. Riskanalysen har begränsats till:

- Personssäkerhetsrisk (faktor G i tabellen Bilaga 3.1-4.1)
- Ekonomisk risk (faktor H i tabellen Bilaga 3.1-4.1)
- Miljörisk (faktor I i tabellen Bilaga 3.1-4.1)

Eftersom det vanligtvis inte finns tillförlitlig skadestatistik från komponenter och system i anläggningen kan inte heller en statistisk utvärdering av sannolikheten för haverier beräknas matematiskt. För att ändå kunna utföra en rimlig bedömning av

haverisannolikheten har arbetsgruppen i anläggningen utfört en analys av konsekvenserna av de 13 investeringar som har valts ut enligt samma teknik (FMEA) som användes i avsnitt 14 för val av kritiska komponenter. Investeringarna framgår av Tabell 3.1-6. En bedömning utfördes enligt samma femgradiga skala som tidigare men ytterligare en faktor för konditionen har lagts in i beräkningen av haverisannolikheten. Konditionen på komponenterna har den största inverkan på haverisannolikheten och måste därför bedömas med största möjliga noggrannhet. Den ekonomiska risken har baserats på relevanta siffror från tidigare reparationer och utbyten av komponenter. Ekonomin har då baserats på den totala kostnaden för ett haveri och har inkluderat både produktionsförluster och projektkostnader för upphandling av nya komponenter. Ju mer realistiska siffror som används ju noggrannare blir riskbedömningen. Eftersom siffrorna blir anläggningsspecifika har dom inte redovisats i kronor i rapporten utan bara en relativ jämförelse mellan de olika investeringarna. Produktionsförlusten blir också beroende på vilken period på året som haveriet sker varför några olika scenarier borde provas för att undersöka effekten av tidpunkten för ett haveri på den ekonomiska konsekvensen. I vår undersökning har ett räkneark i Microsoft Excel används vilket gör det lätt att räkna om med olika ekonomiska siffror och undersöka hur det påverkar prioriteringen av investeringarna.

Haverisannolikheten har beräknats genom att multiplicera värdet på de olika kritiska faktorerna med en viktningsfaktor och sedan addera produkten av dessa. Konditionen har gets den högsta vikt faktorn vilket motiveras av att det är en utvärdering av nuvarande kondition för komponenten. Ursprungsvärden på kvalitet vid tillverkning och konstruktion har givits de lägsta värdena på viktningsfaktorer eftersom de inte är särskilt aktuella för anläggningen. Driftparametrarna (temp, spänning och miljö) har ansetts viktiga och fått en mellanställning. Förfarande framgår av Tabellerna 3.1-4 och 3.1-5. Delsummorna för de olika komponenterna har sedan delats in i intervall från lägsta till högsta värdet för att få en skalning av sannolikheten från 1-100 %.

**Tabell 3.1-4. Viktade sannolikhetsfaktorer.**

| <i><b>Beräkning av haverisannolikhet</b></i> |                                          |                                        |                                          |                                                      |                                                  |                              |                                |
|----------------------------------------------|------------------------------------------|----------------------------------------|------------------------------------------|------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|------------------------------|--------------------------------|
| <b>Invest.<br/>Nr<br/>(1)</b>                | <b>Arbetstem<br/>peratur<br/>vikt 3x</b> | <b>Arbetspän-<br/>ning<br/>vikt 3x</b> | <b>Miljö för<br/>punkten<br/>vikt 3x</b> | <b>Konstruktio-<br/>ns<br/>parameter<br/>vikt 1x</b> | <b>Kvalitet vid<br/>tillverkning<br/>vikt 1x</b> | <b>Kondition<br/>vikt 4x</b> | <b>Sannolikhet<br/>relativ</b> |
| 1                                            | 3                                        | 3                                      | 3                                        | 4                                                    | 1                                                | 4                            | 0,64                           |
| 2                                            | 2                                        | 2                                      | 3                                        | 3                                                    | 1                                                | 2                            | 0,44                           |

För att illustrera beräkningsgången av kan den relativa haverisannolikheten för investering nr 1 beräknas enligt:

$$\text{sannolikheten} = \frac{(3 \times 3 + 3 \times 3 + 3 \times 3 + 4 \times 1 + 1 \times 1 + 4 \times 4)}{(5 \times 3 + 5 \times 3 + 5 \times 3 + 5 \times 1 + 5 \times 1 + 5 \times 4)} = 0,64$$

Tabell 3.1-5. Beräkning av haverisannolikhet

| Beräknat värde<br>(summan av poäng x viktfaktor) | Sannolikhet | Sannolikhet (%) |
|--------------------------------------------------|-------------|-----------------|
| 1-15                                             | 1           | 1-20%           |
| 16-30                                            | 2           | 20-40%          |
| 31-45                                            | 3           | 40-60%          |
| 46-60                                            | 4           | 60-80%          |
| 61-75                                            | 5           | 80-99%          |

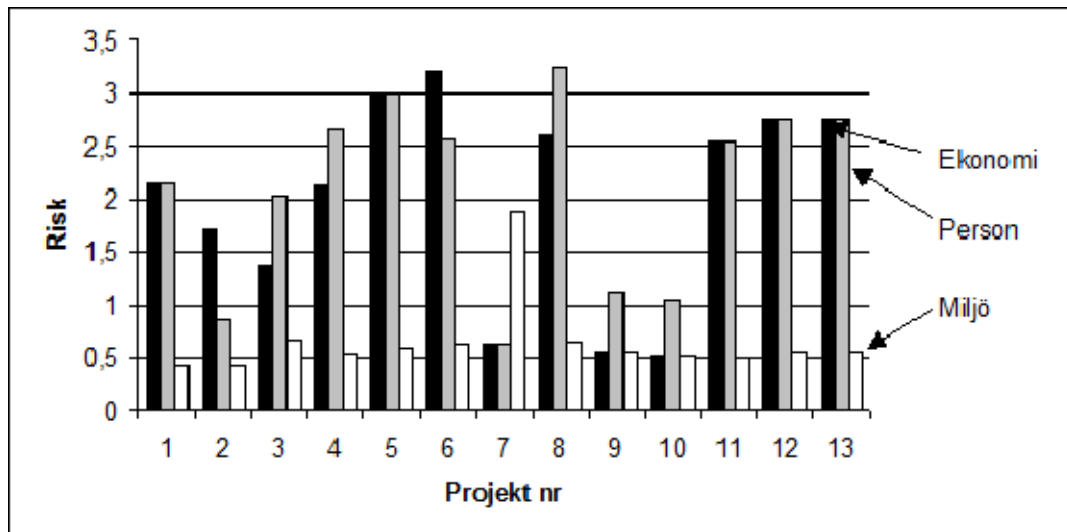
För att kunna värdera olika investeringar i en anläggning har en riskbaserad investeringstabell ställts upp där en prioritering efter deras olika risker kan ske. De olika investeringsprojekten har analyserats av underhålls- och driftpersonalen enligt det tidigare nämnda "Vad händer om inte...." förfarandet (FMEA). Resultatet framgår av Tabell 3.1-6.

Tabell 3.1-6. Risktabell för investeringar

| Komponent<br>/System            | Åtgärd                               | Haveri                | Insident                | Risk   |       |       | Sann. |
|---------------------------------|--------------------------------------|-----------------------|-------------------------|--------|-------|-------|-------|
|                                 |                                      |                       |                         | Person | Ekon. | Miljö |       |
| Ångdom                          | utbyte av ångdom                     | Läcka eller haveri    | Pannstopp och ångläcka  | 2,15   | 2,15  | 0,43  | 0,43  |
| Säkerhetsventil till ångdom     | utbyte/renovering                    | Ångläcka              | Pannstopp och ångläcka  | 1,72   | 0,89  | 0,43  | 0,43  |
| Bottentuber                     | utbyte av tuber                      | Tubläcka              | Pannstopp och ångläcka  | 1,36   | 2,04  | 0,66  | 0,66  |
| Samlingslåda ÖH 1               | utbyte av ångläda                    | Läcka eller haveri    | Pannstopp och ångläcka  | 2,12   | 2,66  | 0,53  | 0,53  |
| Samlingslåda ÖH 2               | utbyte av ångläda                    | Läcka eller haveri    | Pannstopp och ångläcka  | 3      | 3     | 0,6   | 0,6   |
| Högtrycksförvärmare             | utbyte av tuber                      | Tubläcka              | Pannstopp och ångläcka  | 3,2    | 2,56  | 0,64  | 0,64  |
| Inspektionsluckor               | utbyte av luckor                     | Gasläcka              | Läcka rök gaser         | 0,63   | 0,63  | 1,89  | 0,63  |
| Stödbalkar ekonomiser           | utbyte eller ny design av stödbalkar | Tubläcka              | Pannstopp               | 2,6    | 3,25  | 0,66  | 0,66  |
| Matarvattenpump                 | utbyte/renovering av pump            | Pumphaveri            | Pannstopp               | 0,56   | 1,12  | 0,56  | 0,56  |
| Luftförvärmare                  | utbyte av tuber                      | Igersättning av tuber | Försämrad verkningsgrad | 0,52   | 1,04  | 0,52  | 0,52  |
| Ångventil till huvud ångledning | utbyte/renovering av ventil          | Ångläcka              | Pannstopp och ångläcka  | 2,56   | 2,56  | 0,51  | 0,51  |
| Rörböj i huvud ångledning       | utbyte/repasering av T-stycke        | Ångläcka eller haveri | Pannstopp och ångläcka  | 2,75   | 2,75  | 0,55  | 0,55  |
| T-stycke i huvud ångledning     | utbyte/repasering av rörböj          | Ångläcka eller haveri | Pannstopp och ångläcka  | 2,75   | 2,75  | 0,55  | 0,55  |

Resultatet av riskanalysen kan visas i riskmatriser eller stapeldiagram där konsekvenser och risker för olika investeringar kan vägas mot varandra. Genom att presentera en hel anläggnings olika årliga investeringar i risker för t.ex. personsäkerhet kan ett tydligare helhetsintryck erhållas. För kommande driftperioder kan årsvisa utvärderingar göras baserade på en uppgradering av konditionen hos komponenter och system och en långtidsplanering utföras.

Ett resultat av livslängdsanalysen i sin helhet skulle kunna se ut som i Figur 3.1-7 nedan för de 13 investeringarna i Tabell 3.1-6. Genom att presentera de aktuella investeringar och deras risker i form av staplar i ett diagram kan de tre risktyperna personrisk, ekonomisk risk och miljömässig risk jämföras och vägas in vid beslut om prioriteringar. I vårt aktuella fall kan man jämföra ett utbyte av ångdomen (investering nr 1) med ett utbyte av en matarvattenpump (investering nr 9). Personsäkerhetsrisken som förknippas med ett haveri av ångdomen är mycket större än vad som blir fallet vid ett pumphaveri, vilket prioriterar ett dombyte.



Figur 3.1-7. Investeringsrisker

Figure 3.1-7. Investment risks

Slutsatsen blir emellertid annorlunda om man betraktar den låga sannolikheten för ett domshaveri vilket gör att vid en jämförelse med ett utbyte av högtrycksförvärmaren (investering nr 6) blir till fördel för den senare investeringen. Från ekonomisk risksynpunkt kan en renovering av ekonomiserns stödbalkar (investering nr 8) ha en större ekonomisk betydelse än ett utbyte av domen. Orsaken är att ett ekonomiserhaveri kan betyda en mycket lång driftstörning som är betydligt längre än för ett dombyte (som i och för sig också medför lång driftstörning), med dyrbara produktionsförluster som följd.

De investeringar som ingår i system för huvudångledning (investeringar nr 11-13), får de högsta prioriteringarna. Det förklaras med att de har en kombination av höga personsäkerhetsrisker och ekonomiska risker.

Resultatet av en livslängdsanalys skall resultera i årliga utvärderingar av investeringsrisker och prioriteringar som baseras på dessa risker. Genom att summerna kostnaden av olika investeringar kan en anpassning göras av tillgängliga investeringspengar som baseras på de risker man kan bygga bort genom att utföra dessa investeringar. Om man t.ex. gör en investering på 1 miljon i en ny högtrycksförvärmare skall ett rimligt utfall bli att en ekonomisk risk som är betydligt större än 1 miljon byggs bort. Resonemanget bygger naturligtvis på man därigenom inte prioriterar bort en investering som medför att oacceptabelt höga personrisker blir kvar i anläggningen.

### 3.1.17 Investeringsplan

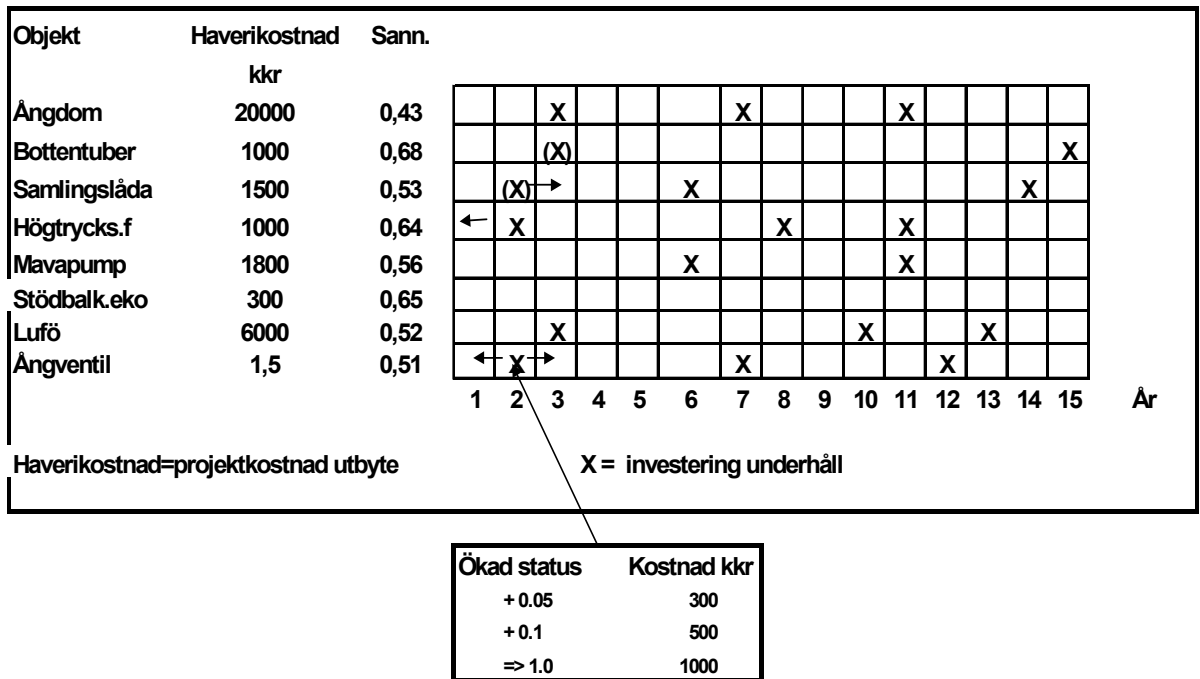
Livslängdsarbete har som syfte att fastställa de viktigaste komponenternas ekonomiska och tekniska livslängd. Genom arbetet kan man successivt fastställa komponenternas tillstånd och haverisannolikhet och därigenom öka säkerheten i anläggningen genom att utföra de underhållsåtgärder som bäst minskar sannolikheten. Ett annat och lika viktigt syfte är att kunna utföra riskbaserade investeringar som speglar den livslängdsanalys som utförts och att ta hänsyn till den ekonomiska risk som ett beslut om en ny investering innebär. Genom hela den beskrivna kedjan av delanalyser från att

ha studerat historiken, till att välja ut och prova de mest kritiska komponenterna med en utvärdering av deras tillstånd, har vi fått en möjlighet till att jämföra resultatet med det tidigare förfarandet som var mer erfarenhetsbaserat. Det faktum att resultatet pekar ut i stort sett samma komponenter som man även tidigare har identifierat har stärkt oss i vår uppfattning att det är en bra och verklighetsanknuten metod vi använt. Det finns med andra ord en stark indikation på att metoden även kan användas för övriga delar av anläggningen. Med en total analys med övriga pannor, turbiner och bränsleanläggningen skapas ett effektivt verktyg för att få en övergripande planering av investeringsbehovet för hela anläggningen.

För att illustrera det slutliga resultatet av analysen har resultatet av livslängdsanalysen, med utvärderade risker används till att ta fram en långsiktig investeringsplan för panna 2 i Hässelby. Resultatet visas i Figur 3.1-8 där den närmaste 15-årsperioden konstruerats för tio av dom tidigare 13 planerade investeringarna. Planen har baserats på riskutvärderingen i Tabell 3.1-6. Som haverikostnad har vi valt att enbart ta med materialkostnaden och inte kostnad för produktionsbortfall. Orsaken är att dessa kostnader är anläggningsspecifika och dessutom beroende på vilken tidsperiod man betraktar och därför är mindre intressanta för läsaren av rapporten. I det riktiga fallet för den egna anläggningen skall naturligtvis alla kostnader som kan förknippas med ett haveri tas med i beräkningen. I figuren har vi genom att prioritera de investeringar med hög risk och lägga dom tidigare i planen försökt att minska riskerna. Vi har också illustrerat förändringar i investeringsbudgetens storlek genom att visa hur investeringar med en lägre risk skjutas framåt i tiden och de med en högre risk närmre i tiden. Förfarandet framgår genom pilarna och kryssen. En årlig uppdatering av

investeringsplanen måste göras för att de beräknade riskerna skall ge riktiga värden. Komponenternas kondition förändras kontinuerligt vilket också påverkar deras haverisannolikhet. I ett fungerande system på en anläggning sker en kontinuerlig inmatning av data i analysen men en utvärdering behöver inte ske mer än ett par gånger om året.





Figur 8 Riskbaserad investeringsplan

Figure 8 Risk based investment plan.

### 3.1.18 Erfarenheter av arbetet

Arbetet i grupperna har resulterat i följande erfarenheter till projektet:

- Det är viktigt att utföra ett noggrant planeringsarbete innan arbetet börjar med strikta tid/kostnadsramar. Det är inte minst viktigt med tanke på att livslängdsanalyser inte alltid följer det normala arbetsmönstret på anläggningarna och det finns en uppenbar risk för förseningar och utökade projektkostnader.
- De olika arbetsgrupperna skall arbeta oberoende av varandra med separata mål och rapporteringstillfällen. Det är dock nödvändigt med support från specialister vid sammanställning av historik för att rätt data skall sammanställas.
- Arbetet med att ta fram en fyllig historik var arbetskrävande och bör inte utföras över alltför kort tid (helst 1-2 månader under deltid). Det var också svårt att få en kontinuerlig och heltäckande historik. Vissa perioder var dåligt dokumenterade och personliga intervjuer kunde inte riktigt täcka in luckorna. En del perioder saknades och det var förvånande nog från en relativt sen driftperiod. Ett system (datoriserat eller manuellt) för lagring av underhåll och drifthistorik är synnerligen viktigt för livslängdsanalyser, men det måste lagras relevant data för komponenter. Icke redovisad data kan inte rekapituleras redan efter några år.
- Urvalskriterier för att välja kritiska komponenter måste vara välbearbetade och accepterade av alla som ingår i grupperna. Det är svårt att ändra på dem senare i arbetet.
- En person relativt högt upp i organisationen på anläggningen bör vara ytterst ansvarig för livslängdsanalysen. Konsulter kan vara projektledare och stöd i arbetet men det måste vara förankrat i kraftvärmeverkets ledning eftersom större

investeringar beslutas på den nivån. Ett kontinuerligt arbete med livslängdsanalyser ger en möjlighet till en förbättrat beslutsunderlag under en längre tidsperiod.

### 3.1.19 Slutsatser

Ett antal slutsatser har kunnat dras från de olika stadierna av livslängdsanalysen. Några av de viktigaste är:

- Feleffektsanalyser är användbara för livslängdsanalyser av system i kraftvärmeverk.
- Det första som måste göras innan en analys kan påbörjas är att skapa ett välstrukturerat register över komponenterna i den enhet som skall studeras. En inte alltför detaljrik nivå måste väljas för att inte studien skall bli för omfattande och dyrbar.
- Ett brett perspektiv skall hållas i analysen och detaljresonemang skall undvikas.
- Livslängdsanalysen är ett effektivt verktyg för att planera komponentprovningen över ett längre perspektiv. De identifierade kritiska komponenternas tillstånd måste vara definierat genom en provning eller inspektion för en fortsatt livslängdsanalys.
- I Hässelbyanläggningen har ett tiotal kritiska komponenter identifierats som kritiska med en hög haverisannolikhet. Ångkylaren och högtrycksångssystemet har de högsta värdena på riskfaktor.

### REFERENSER

- Bjurström B. 1998. Livslängdsbedömning – erfarenheter och utveckling in Japan, Värmeforsk resultat no 106.
- Fisher D. 1999. Optimising the implementation of a risk based inspection program in a complex facility, CAPE '99, 12-16 April 1999 (not in proceedings).
- Fritz C. 1990. Feleffektsanalys (Failure mode and effect analysis FMEA) för svensk industri, IVF-resultat nr 89632.
- House K. A. Transient Monitoring Program at Sequoyah Nuclear Plant units 1 and 2.
- Neubauer B. 1981. Criteria for prolonging the safe operation of structures through the assessment of onset of creep damage using non-destructive metallographic measurements. Proceedings of the International conference on Creep and Fracture of Engineering Materials and Structure, Pineridge Press, Swansea, 1981, pp 617-627.
- Tillgänglighetsstatistik för värmekraft 1995. 1996. Rapport från Nordels sekretariat Helsingfors.
- Masamori S. & Mimaki H. 1992. Aging Management Program for PWR Nuclear Power Plants in Japan, Service and Life Management in Operating Plants, ASME 1992, pp 47-52

## Bilaga 3.1-1 Historik för Panna 2

| Panna 2 Hässelbyverket |         |        |         |          |                    |          |
|------------------------|---------|--------|---------|----------|--------------------|----------|
| Årtal                  | Drift h | acku H | starter | Bränsle  | Antal h<br>T>500 C | Anm.     |
| 19-                    |         |        |         |          |                    |          |
| 59                     | 1335    | 1335   | 42      | olja     | 0                  |          |
| 60                     | 2253    | 3588   | 66      | olja     | 0                  |          |
| 61                     | 788     | 4376   | 71      | olja     | 0                  |          |
| 62                     | 516     | 4892   | 51      | olja     | 0                  |          |
| 63                     | 1252    | 6144   | 89      | olja     | 0                  |          |
| 64                     | 635     | 6779   | 80      | olja     | 0                  |          |
| 65                     | 565     | 7344   | 88      | olja     | 0                  |          |
| 66                     | 2592    | 9936   | 109     | olja     | 0                  |          |
| 67                     | 1003    | 10939  | 104     | olja     | 0                  |          |
| 68                     | 2271    | 13210  | 70      | olja     | 2271               |          |
| 69                     | 5763    | 18973  | 25      | olja     | 5763               |          |
| 70                     | 4981    | 23954  | 33      | olja     | 4981               |          |
| 71                     | 3765    | 27719  | 108     | olja     | 3765               |          |
| 72                     | 4127    | 31846  | 108     | kol/olja | 0                  |          |
| 73                     | 3815    | 35661  | 75      | kol/olja | 0                  |          |
| 74                     | 4693    | 40354  | 55      | kol/olja | 0                  |          |
| 75                     | 4969    | 45323  | 79      | kol/olja | 2500               | Gissning |
| 76                     | 1805    | 47128  | 22      | kol/olja | 0                  |          |
| 77                     | 3868    | 50996  | 20      | kol/olja | 0                  |          |
| 78                     | 5684    | 56680  | 32      | kol/olja | 0                  |          |
| 79                     | 4861    | 61541  | 19      | kol/olja | 0                  |          |
| 80                     | 5376    | 66917  | 20      | kol/olja | 0                  |          |
| 81                     | 4153    | 71070  | 30      | kol/olja | 0                  | Gissning |
| 82                     | 2374    | 73444  | 40      | kol/olja | 0                  | Gissning |
| 83                     | 3785    | 77229  | 82      | kol      | 0                  |          |
| 84                     | 3697    | 80926  | 35      | kol      | 0                  |          |
| 85                     | 4457    | 85383  | 16      | kol      | 0                  |          |
| 86                     | 5045    | 90428  | 13      | kol      | 0                  |          |
| 87                     | 4045    | 94473  | 10      | kol      | 0                  |          |
| 88                     | 5175    | 99648  | 10      | kol      | 0                  |          |
| 89                     | 3750    | 103398 | 12      | kol      | 0                  |          |
| 90                     | 2219    | 105617 | 24      | kol      | 0                  |          |
| 91                     | 3875    | 109492 | 31      | kol      | 0                  |          |
| 92                     | 3059    | 112551 | 32      | kol      | 0                  |          |
| 93                     | 3434    | 115985 | 31      | olja     | 0                  |          |
| 94                     | 5086    | 121071 | 24      | trä/olja | 0                  |          |
| 95                     | 5842    | 126913 | 8       | trä/olja | 0                  |          |
| 96                     | 5858    | 132771 | 30      | trä/olja | 0                  |          |
| 97                     | 5774    | 138545 | 29      | trä/olja | 0                  |          |
| 98                     |         |        |         |          |                    |          |
| Summa                  | 138545  | timmar | 1823    |          | 19280              |          |

## Bilaga 3.1-2 Provningshistorik pannan

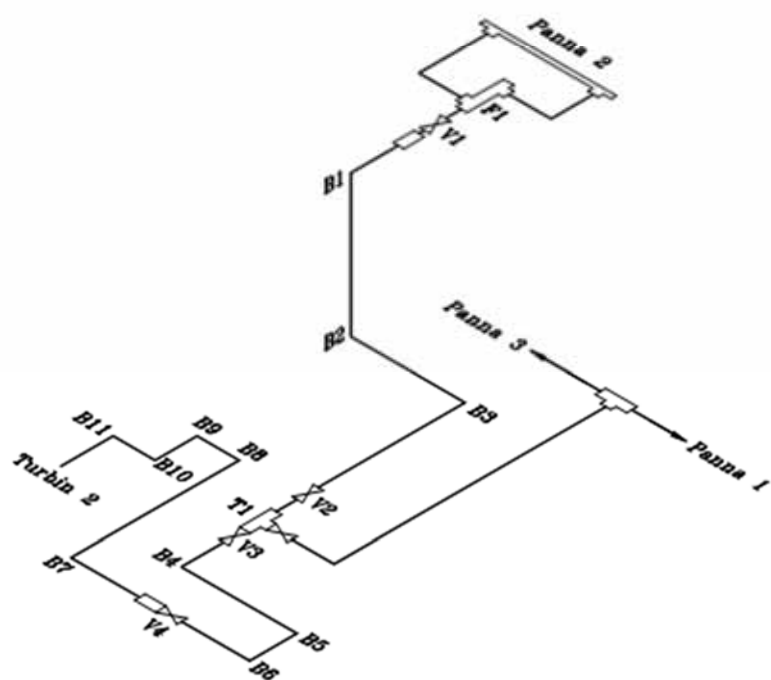
| PROVNINGS HISTORIK ÅRSBESYR PANNA 2 i Ångpannehuset |        |        |             |       |       |                  |        |       |                           |       |       |      |          |                                   |
|-----------------------------------------------------|--------|--------|-------------|-------|-------|------------------|--------|-------|---------------------------|-------|-------|------|----------|-----------------------------------|
|                                                     | 1986   | 1987   | 1988        | 1989  | 1990  | 1991             | 1992   | 1993  | 1994                      | 1995  | 1996  | 1997 | 1998     |                                   |
| Högr / distriktsmästare                             |        |        |             |       |       |                  |        |       |                           |       |       |      | UT       |                                   |
| Vatervatten ledning                                 |        |        |             |       |       |                  |        |       |                           |       |       |      |          |                                   |
| Ekonomier fördelningsåta                            |        |        |             |       |       |                  |        |       |                           |       |       |      |          |                                   |
| Ekonomier                                           |        |        |             |       |       |                  |        |       |                           |       |       |      |          |                                   |
| Varm och                                            | UT     | UT     | UT          | UT    | UT    | UT               | UT     | UT    | UT                        | UT    | UT    | UT   | UT       |                                   |
| Källor                                              | UT     | UT     | UT          | UT    | UT    | UT               | UT     | UT    | UT                        | UT    | UT    | UT   | UT       |                                   |
| Vägar                                               | UT     | UT     | UT          | UT    | UT    | UT               | UT     | UT    | UT                        | UT    | UT    | UT   | UT       |                                   |
| Exp. stöckkonstruktion                              | UT     | UT     | UT          | UT    | UT    | UT               | UT     | UT    | UT                        | UT    | UT    | UT   | UT       |                                   |
| Ekonomier sammanåta                                 |        |        |             |       |       |                  |        |       |                           |       |       |      |          |                                   |
| Ek - Dörrar                                         |        |        |             |       |       |                  |        |       |                           |       |       |      |          |                                   |
| Dörrar                                              |        |        |             |       |       |                  |        |       | Enda                      |       |       |      |          |                                   |
| Dörrar - Dom                                        |        |        |             |       |       |                  |        |       |                           |       |       |      |          |                                   |
| Fälld (16 st)                                       |        |        |             |       |       |                  |        |       |                           |       | UT    |      |          | Infästning fälld-dom. resultat OK |
| Fördörr för eldstadväggar<br>bak och fram           |        |        |             |       |       | tu<br>ut<br>Enda |        |       |                           |       |       |      |          | Resultat OK                       |
| Fördörr för eldstadväggar<br>sidovägg               | UT     | UT     | UT          | UT    | UT    | UT               | UT     | UT    | UT                        | UT    | UT    | UT   | UT       | Kontroll passivitet               |
| Eldstadväggvår (16 skida delar)                     |        |        |             |       |       |                  |        |       |                           |       |       |      |          |                                   |
| Bottenbaser skida                                   |        |        |             |       |       | tu               |        | tu ta |                           | tu    | tu    | tu   |          |                                   |
| Frontvägg                                           |        |        |             |       | tu    |                  | tu     | tu ta |                           | tu    | tu    | tu   |          |                                   |
| Bak och sidovägg                                    |        |        |             |       | tu ta |                  | tu ta  | tu ta | tu ta                     | tu ta | tu ta | tu   | tu ta    | Skilvid behov                     |
| Bäningsdörr väggvår främre del                      |        |        |             |       |       |                  |        |       |                           |       |       |      |          |                                   |
| Bäningsdörr väggvår, b f taket                      |        |        |             |       |       |                  |        |       |                           |       |       |      |          |                                   |
| Leaning till omen                                   |        |        |             |       |       |                  |        |       |                           |       |       |      |          |                                   |
| Dom skenets skenier                                 |        |        |             |       |       |                  |        |       |                           |       | UT    |      |          | Infästning vett-dom. resultat OK  |
| Angdom                                              | UT     | UT     | UT          | UT    | UT    | UT               | UT     | UT    | UT                        | UT    | UT    | UT   | UT       |                                   |
| Leaning till ÖH 1 fördelningsåta                    |        |        |             |       | tu    |                  |        |       |                           |       |       |      |          | Skilvar och oöar                  |
| ÖH 1 Fördelningsåta                                 |        |        |             |       |       |                  |        |       |                           |       |       |      |          |                                   |
| ÖH 1 Rännrör                                        | tu ta  |        | tu ta       |       | tu ta |                  | tu ta  |       | tu ta                     |       | tu ta |      | tu       |                                   |
| ÖH 1 Bäningsåta                                     | UT     | UT     | UT          | UT    | UT    | UT               | UT     | UT    | UT                        | UT    | UT    | UT   | UT       | Aiser fädrupphängning             |
| Leaning till Angvare                                | Rek-ut |        |             |       |       |                  |        |       |                           |       |       |      |          |                                   |
| Angvare                                             |        | Rek-ut |             |       |       |                  | Rek-ut |       |                           |       |       |      |          |                                   |
| Leaning till ÖH 2 fördelningsåta                    |        |        |             |       | tu    |                  |        |       |                           |       |       |      |          | Skilvar och oöar                  |
| ÖH 2 Fördelningsåta                                 |        |        |             |       |       |                  |        |       |                           |       |       |      |          |                                   |
| ÖH 2 Rännrör                                        | ut ta  | ut ta  | ut ta       | ut ta | ut ta | ut ta            | ut ta  | ut ta | ut ta                     | ut ta | ut ta | ut   | ut ta tu |                                   |
| ÖH 2 Bäningsåta                                     | UT     | UT     | UT          | UT    | UT    | UT               | UT     | UT    | UT                        | UT    | UT    | UT   | UT       | Aiser fädrupphängning             |
| Leaning från samman till formstucke                 |        |        |             |       |       |                  |        |       |                           |       |       |      |          |                                   |
| Formstucke                                          |        |        |             |       |       |                  |        |       |                           |       |       |      |          |                                   |
| Angledning                                          |        |        |             |       |       |                  |        |       |                           |       |       |      |          |                                   |
| FORKLARINGAR                                        | End    |        | Endoskopi   |       |       |                  | MT     |       | Maonetartikel             |       |       |      |          |                                   |
|                                                     | TS     |        | Tyb prov    |       |       |                  | TM     |       | Tiodlekemätning           |       |       |      |          |                                   |
|                                                     | Rep    |        | Replicering |       |       |                  | VT     |       | Visuell (okulär) provning |       |       |      |          |                                   |

## Bilaga 3.1-3 Provningshistorik ångsystem

PROVNINGSHISTORIA HÄSSELBY PANNA 2 / Ångledningen

EPC System 2001 / 4001

|         | S2001               | EPC<br>kalkyl -86 | 1985               | 1986 | 1987           |
|---------|---------------------|-------------------|--------------------|------|----------------|
| F1      | 96-93               |                   |                    |      |                |
| Rak del | 93-91               |                   |                    |      |                |
| V1      | 91-89               |                   |                    |      |                |
| B1      | 89-87               |                   |                    |      |                |
| Rak del | 87-69               |                   |                    |      |                |
| B2      | 69-67               | > 80 MPa          |                    |      | Rep + MT (fog) |
| Rak del | 67-63               | "                 |                    |      |                |
| B3      | 63-61               | "                 |                    |      |                |
| Rak del | 61-53               | "                 |                    |      |                |
| V2      | 53-50               | "                 |                    |      |                |
| T1      | 50-46               | "                 | Rep                |      |                |
| V3      | 46-44               |                   |                    |      |                |
| Rak del | 44-42               |                   |                    |      |                |
| B4      | 42-40               |                   | Rep+MT (fog efter) |      |                |
| Rak del | 40-37               |                   |                    |      |                |
| B5      | 37-35               |                   | Rep                | Rep  |                |
| Rak del | 35-34               |                   |                    |      |                |
| B6      | 34-32               |                   | Rep                | Rep  |                |
| Rak del | 32-22 (fläns 29-24) |                   |                    |      |                |
| B7      | 22-20               |                   |                    |      |                |
| Rak del | 20-17               |                   |                    |      |                |
| B8      | 17-15               |                   | Rep                |      |                |
| Rak del | 15-14               |                   |                    |      |                |
| B9      | 14-12               |                   | Rep                |      |                |
| Rak del | 12-8                |                   |                    |      |                |
| B10     | 8-6                 |                   |                    |      |                |
| Rak del | 6-4                 |                   |                    |      |                |
| B11     | 4-2                 |                   |                    |      |                |
| Turbin  | 1                   |                   |                    |      |                |



### Bilaga 3.1-4.1 Haveririsk för kritiska komponenter (hög siffra=hög risk)

| Komponentgrupp                                 | A<br>Arbets<br>Temp | B<br>Arbets<br>spänning | C<br>Miljö för<br>punkten | D<br>Konstruktion<br>s parametrar | E<br>Kvalitet vid<br>tillverkning | F   | G<br>Person<br>säkerhet | H<br>Ekonomi | I<br>Yttre miljö | J    | KRITISK<br>KOMponent |
|------------------------------------------------|---------------------|-------------------------|---------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----|-------------------------|--------------|------------------|------|----------------------|
| <b>Ångpanna</b>                                |                     |                         |                           |                                   |                                   |     |                         |              |                  |      |                      |
| Höghydrostatiskt                               | 3                   | 3                       | 3                         | 4                                 | 1                                 | 108 | 5                       | 4            | 1                | 2160 | Hög                  |
| Ångpanna                                       | 3                   | 3                       | 3                         | 3                                 | 1                                 | 84  | 4                       | 5            | 1                | 1080 | Medel                |
| Medelstatiskt                                  | 2                   | 2                       | 2                         | 2                                 | 1                                 | 18  | 3                       | 3            | 1                | 99   | Låg                  |
| Ekonomisk del                                  | 3                   | 3                       | 4                         | 3                                 | 1                                 | 72  | 5                       | 2            | 1                | 144  | Låg                  |
| Ekonomisk del                                  | 3                   | 3                       | 3                         | 2                                 | 1                                 | 64  | 1                       | 2            | 1                | 108  | Låg                  |
| Leaning Boil Coaster                           | 2                   | 3                       | 3                         | 3                                 | 1                                 | 24  | 1                       | 3            | 1                | 48   | Låg                  |
| Coastal                                        | 2                   | 3                       | 3                         | 4                                 | 1                                 | 72  | 5                       | 4            | 1                | 1440 | Medel                |
| Leaning Boil Coaster i Ångpanna                | 2                   | 3                       | 3                         | 2                                 | 1                                 | 36  | 2                       | 3            | 1                | 216  | Låg                  |
| Boiler                                         | 2                   | 3                       | 3                         | 1                                 | 1                                 | 12  | 5                       | 4            | 1                | 240  | Låg                  |
| <b>Förseendeelement för eldledningsledning</b> |                     |                         |                           |                                   |                                   |     |                         |              |                  |      |                      |
| Ellednings                                     | 2                   | 3                       | 4                         | 3                                 | 1                                 | 72  | 5                       | 4            | 1                | 1440 | Medel                |
| Ellednings                                     | 2                   | 3                       | 4                         | 3                                 | 1                                 | 72  | 5                       | 4            | 1                | 1440 | Medel                |
| Ellednings                                     | 2                   | 3                       | 4                         | 3                                 | 1                                 | 72  | 5                       | 4            | 1                | 1440 | Medel                |
| <b>Väggstöd</b>                                |                     |                         |                           |                                   |                                   |     |                         |              |                  |      |                      |
| Ständigt stöd                                  | 2                   | 3                       | 5                         | 4                                 | 1                                 | 120 | 2                       | 3            | 1                | 720  | Medel                |
| Överföring                                     | 2                   | 3                       | 4                         | 3                                 | 1                                 | 72  | 2                       | 3            | 1                | 432  | Låg                  |
| Överföring                                     | 2                   | 3                       | 3                         | 3                                 | 1                                 | 64  | 2                       | 3            | 1                | 324  | Låg                  |
| Överföring                                     | 2                   | 3                       | 3                         | 3                                 | 1                                 | 64  | 2                       | 3            | 1                | 324  | Låg                  |
| Överföring                                     | 2                   | 3                       | 4                         | 3                                 | 1                                 | 90  | 2                       | 3            | 1                | 540  | Låg                  |
| Överföring                                     | 2                   | 3                       | 5                         | 4                                 | 1                                 | 180 | 2                       | 3            | 1                | 900  | Medel                |
| Överföring                                     | 2                   | 3                       | 4                         | 3                                 | 1                                 | 72  | 2                       | 3            | 1                | 432  | Låg                  |
| Takstöd                                        | 2                   | 3                       | 3                         | 4                                 | 1                                 | 72  | 2                       | 3            | 1                | 432  | Låg                  |
| <b>Överföring för väggstöd</b>                 | 2                   | 3                       | 3                         | 4                                 | 1                                 | 72  | 5                       | 5            | 1                | 1800 | Medel                |
| <b>Leaning i Ångpanna</b>                      | 2                   | 3                       | 3                         | 3                                 | 1                                 | 64  | 3                       | 3            | 1                | 486  | Låg                  |
| Ekonomisk del                                  | 3                   | 3                       | 2                         | 4                                 | 1                                 | 72  | 4                       | 5            | 1                | 1440 | Medel                |
| Ångpanna                                       | 3                   | 3                       | 3                         | 5                                 | 1                                 | 135 | 5                       | 5            | 1                | 3375 | Hög                  |
| <b>Leaning i ÖH i förseendeelement</b>         | 3                   | 3                       | 3                         | 3                                 | 1                                 | 81  | 3                       | 4            | 1                | 972  | Låg                  |
| ÖH i förseendeelement                          | 3                   | 3                       | 3                         | 4                                 | 1                                 | 108 | 4                       | 5            | 1                | 2160 | Hög                  |
| <b>ÖH</b>                                      |                     |                         |                           |                                   |                                   |     |                         |              |                  |      |                      |
| ÖH i ekonomisk del                             | 3                   | 3                       | 3                         | 4                                 | 1                                 | 108 | 2                       | 3            | 1                | 648  | Medel                |
| ÖH i ekonomisk del                             | 3                   | 3                       | 4                         | 4                                 | 1                                 | 144 | 2                       | 3            | 1                | 864  | Medel                |
| <b>ÖH i samningsdel</b>                        | 3                   | 3                       | 3                         | 4                                 | 1                                 | 108 | 4                       | 5            | 1                | 2160 | Hög                  |
| Leaning till ÖH i förseendeelement             | 3                   | 3                       | 3                         | 3                                 | 1                                 | 81  | 3                       | 4            | 1                | 972  | Låg                  |
| Ångpanna                                       | 3                   | 2                       | 3                         | 4                                 | 2                                 | 144 | 5                       | 4            | 1                | 2880 | Hög                  |
| Leaning till ÖH i förseendeelement             | 3                   | 2                       | 3                         | 3                                 | 1                                 | 64  | 3                       | 4            | 1                | 648  | Låg                  |
| ÖH i förseendeelement                          | 3                   | 3                       | 3                         | 5                                 | 1                                 | 135 | 5                       | 5            | 1                | 3375 | Hög                  |
| <b>ÖH</b>                                      |                     |                         |                           |                                   |                                   |     |                         |              |                  |      |                      |
| ÖH i ekonomisk del                             | 3                   | 3                       | 4                         | 4                                 | 1                                 | 144 | 2                       | 3            | 1                | 864  | Medel                |
| ÖH i ekonomisk del                             | 3                   | 3                       | 5                         | 4                                 | 1                                 | 180 | 2                       | 3            | 1                | 1080 | Hög                  |
| <b>ÖH i samningsdel</b>                        | 3                   | 3                       | 3                         | 4                                 | 1                                 | 108 | 5                       | 5            | 1                | 2700 | Hög                  |
| Leaning till samningsdel i Höghydrostatiskt    | 3                   | 3                       | 3                         | 3                                 | 1                                 | 81  | 5                       | 5            | 1                | 2025 | Medel                |



### Bilaga 3.1-4.2 Haveririsk för kritiska komponenter (hög siffra=hög risk)

| Komponentgrupp            | A                | B                 | C                       | D                         | E               | F       | G           | H | I | J | KRITISK KOMPONENT |
|---------------------------|------------------|-------------------|-------------------------|---------------------------|-----------------|---------|-------------|---|---|---|-------------------|
| Arbets tempo              | Arbets planering | Miljö för punkten | Konstruktion parametrar | Kvalitet vid tillverkning | Person säkerhet | Ekonomi | Yttre miljö |   |   |   |                   |
| <b>Övrig konstruktion</b> |                  |                   |                         |                           |                 |         |             |   |   |   |                   |
| Bänkstav                  | 1                | 1                 | 3                       | 1                         | 3               | 1       | 9           | 4 | 5 | 1 | 180 Låg           |
| Isolering                 | 32               | 1                 | 1                       | 2                         | 1               | 1       | 2           | 3 | 2 | 1 | 12 Låg            |
| Asbest                    | 33               | 1                 | 1                       | 2                         | 1               | 1       | 2           | 5 | 5 | 1 | 50 Låg            |
| Gastburet                 | 34               | 1                 | 1                       | 4                         | 3               | 3       | 35          | 2 | 3 | 1 | 215 Låg           |
| Brännare                  | 35               | 4                 | 3                       | 4                         | 3               | 1       | 144         | 2 | 3 | 1 | 824 Medel         |
| Brännarpoänger            | 22               | 4                 | 3                       | 5                         | 4               | 1       | 240         | 2 | 4 | 1 | 1920 Hög          |
| Inspektionsluckor         | 23               | 4                 | 3                       | 3                         | 4               | 1       | 144         | 2 | 4 | 1 | 1152 Hög          |
| Sottläsare                | 24               | 4                 | 3                       | 4                         | 4               | 1       | 192         | 2 | 4 | 1 | 1536 Hög          |
| Luftportar                | 25               | 4                 | 3                       | 3                         | 4               | 1       | 144         | 2 | 4 | 1 | 1152 Hög          |
| Armarur                   | 30               | 3                 | 3                       | 2                         | 3               | 1       | 54          | 4 | 5 | 1 | 1080 Medel        |
| Exoskopar                 | 28               | 2                 | 2                       | 2                         | 2               | 1       | 16          | 1 | 2 | 1 | 32 Låg            |
| Exobakar                  | 29               | 3                 | 3                       | 2                         | 3               | 2       | 108         | 4 | 5 | 1 | 2160 Hög          |
| Ängsmåttare               | 37               | 2                 | 1                       | 3                         | 4               | 1       | 24          | 1 | 2 | 1 | 48 Låg            |
| Ljungsområde              | 38               | 3                 | 2                       | 4                         | 4               | 1       | 96          | 1 | 2 | 1 | 192 Låg           |
| Rokgaskärl inne           | 36               | 2                 | 3                       | 3                         | 4               | 1       | 72          | 1 | 2 | 1 | 144 Låg           |
| Rokgaskärl ut             | 39               | 3                 | 2                       | 4                         | 4               | 1       | 96          | 1 | 2 | 1 | 192 Låg           |
| Rokgaskärl för skorsten   | 41               | 3                 | 2                       | 4                         | 5               | 1       | 120         | 1 | 2 | 3 | 720 Medel         |
| Skorsten                  | 42               | 3                 | 2                       | 4                         | 5               | 1       | 120         | 1 | 3 | 3 | 1080 Hög          |
| Botenaskutmatning         | 40               | 2                 | 2                       | 3                         | 2               | 1       | 24          | 1 | 2 | 1 | 48 Låg            |
| <b>Högtryckssystem</b>    |                  |                   |                         |                           |                 |         |             |   |   |   |                   |
| Rör                       | 43               | 3                 | 3                       | 3                         | 2               | 1       | 54          | 5 | 5 | 1 | 1350 Medel        |
| Formstucken               | 44               | 3                 | 3                       | 3                         | 5               | 1       | 135         | 5 | 5 | 1 | 3375 Hög          |
| Rörölar                   | 45               | 3                 | 3                       | 4                         | 4               | 1       | 144         | 5 | 5 | 1 | 3600 Hög          |
| Uppslagningsrör           | 46               | 2                 | 4                       | 1                         | 4               | 3       | 96          | 3 | 3 | 1 | 824 Låg           |



## Bilaga 3.1-5 Provningsplan för panna 2

Indelning av pannans tryckkärl i komponenter för oförändrade provningsplanering  
 Delning enligt flödesrättning, vatten-ångorproduktion. För beteckningar se pannelskissen fig 4.

|                                       |                              | 1999            | 2000   | 2001       | 2002            | 2003       | 2004   | 2005            | 2006   | 2007       | 2008            |
|---------------------------------------|------------------------------|-----------------|--------|------------|-----------------|------------|--------|-----------------|--------|------------|-----------------|
| Högtrycksförbrännare                  | Drift beteckning             | VT              |        |            |                 |            |        |                 |        |            |                 |
| Medeltrycksledning                    | Korrosion                    | (MT, TM)        |        |            | (MT, TM)        |            |        | (MT, TM)        |        |            | (MT, TM)        |
| Bännsälar fördräktsskåp               | Utnestning, erosion          |                 |        |            |                 |            |        |                 |        |            |                 |
| Bännsälar (stötkonstruktion)          | Utnestning                   | VT, TM, MT      | VT, TM | VT, TM     | VT, TM, MT      | VT, TM     | VT, TM | VT, TM, MT      | VT, TM | VT, TM     | VT, TM, MT      |
|                                       | Värmeväxlar                  |                 |        |            |                 |            |        |                 |        |            |                 |
|                                       | Kallvätska                   |                 |        |            |                 |            |        |                 |        |            |                 |
|                                       | Vägg                         |                 |        |            |                 |            |        |                 |        |            |                 |
| Bännsälar samlingsåra                 | Utnestning                   |                 |        |            |                 |            |        |                 |        |            |                 |
| Bo + Coesia                           | Korrosion, erosion           |                 |        |            |                 |            |        |                 |        |            |                 |
| Coesia                                | Korrosion, erosion           | VT, TM, End     |        |            | VT, TM          |            |        | VT, TM, End     |        |            | VT, TM          |
| Coesia + Dom                          | Korrosion, erosion           |                 |        |            |                 |            |        |                 |        |            |                 |
| Faktor (X st)                         | Erosion, korrosion           | TM              |        |            | TM              |            |        | TM              |        |            | VT, TM          |
| Faktor för eldstävsåpp (16 st)        | Korrosion                    |                 |        |            |                 |            |        |                 |        |            |                 |
| Rör mellan huvudledning och fördelare | Korrosion                    |                 |        |            |                 |            |        |                 |        |            |                 |
| Faktor för eldstävsåpp (16 st)        | Korrosion                    |                 |        |            |                 |            |        |                 |        |            |                 |
| Eldstävsåpp                           | Inre korrosion, överhettning | VT, TM, TS      | VT, TM | VT, TM, TS | VT, TM          | VT, TM, TS | VT, TM | VT, TM, TS      | VT, TM | VT, TM, TS | VT, TM          |
|                                       | Stentuber åpp                |                 |        |            |                 |            |        |                 |        |            |                 |
|                                       | Nedersta åpp                 |                 |        |            |                 |            |        |                 |        |            |                 |
|                                       | Nedersta åpp                 |                 |        |            |                 |            |        |                 |        |            |                 |
|                                       | Nedersta åpp                 |                 |        |            |                 |            |        |                 |        |            |                 |
|                                       | Övre åpp                     |                 |        |            |                 |            |        |                 |        |            |                 |
|                                       | Övre åpp                     |                 |        |            |                 |            |        |                 |        |            |                 |
|                                       | Övre åpp                     |                 |        |            |                 |            |        |                 |        |            |                 |
|                                       | Övre åpp                     |                 |        |            |                 |            |        |                 |        |            |                 |
|                                       | Övre åpp                     |                 |        |            |                 |            |        |                 |        |            |                 |
|                                       | Övre åpp                     |                 |        |            |                 |            |        |                 |        |            |                 |
| Bännsälar för vattenåpp               | Utnestning, korrosion        | End             |        |            |                 |            |        |                 |        |            |                 |
| Bännsälar för vattenåpp               | Utnestning, korrosion        |                 |        |            | End             |            |        |                 |        |            |                 |
| Leaning till åppen                    | Utnestning, erosion          |                 |        |            |                 |            |        |                 |        |            |                 |
| Angivare                              | spänningserosion, korrosion  | VT, MT          |        |            | VT, MT          |            |        | VT, MT          |        |            | VT, MT          |
| Leaning till OH 1 fördräktsskåp       | Utnestning, korrosion        |                 |        |            |                 |            |        |                 |        |            |                 |
| OH 1 Fördräktsskåp                    |                              |                 |        |            |                 |            |        |                 |        |            |                 |
| OH 1 Rörutöver (recess)               | End korrosion, överhettning  | VT, TM          | VT     | VT         | VT, TM          | VT         | VT     | VT, TM          | VT     | VT         | VT, TM          |
|                                       | Övre (Kall) de               | VT, TM          | VT     | VT         | VT, TM          | VT         | VT     | VT, TM          | VT     | VT         | VT, TM          |
|                                       | Neder (Varm) de              | VT, TM          | VT     | VT         | VT, TM          | VT         | VT     | VT, TM          | VT     | VT         | VT, TM          |
| OH 1 Bännsälar                        | Utnestning                   | End, MT         |        |            |                 |            |        |                 |        |            |                 |
| Leaning till Angivare                 | Utnestning                   |                 |        |            |                 |            |        |                 |        |            |                 |
| Angivare                              | Utnestning, erosion          | End, MT         |        |            | End             |            |        | End, MT         |        |            | End             |
| Leaning till OH 2 fördräktsskåp       | Utnestning                   |                 |        |            |                 |            |        |                 |        |            |                 |
| OH 2 Fördräktsskåp                    | Utnestning                   | End, MT         |        |            |                 |            |        | End, MT         |        |            |                 |
| OH 2 Rörutöver                        | End korrosion, krympning     | VT, TM, TS      |        |            | VT, TM, TS      |            |        | VT, TM, TS      |        |            | VT, TM, TS      |
|                                       | Övre (Varm) de               | VT              | VT     |            |                 |            |        |                 |        |            |                 |
|                                       | Neder (Kall) de              | VT, TM, TS      |        | VT, TM     |                 |            |        |                 |        |            |                 |
| OH 2 Bännsälar                        | Krympning, utsmältning       | MT+Rep (40-60%) |        |            | MT+Rep (20-30%) |            |        | MT+Rep (40-60%) |        |            | MT+Rep (20-30%) |
| Leaning till senare tillförsyck       | Krympning, utsmältning       | MT+Rep          |        |            | MT+Rep          |            |        | MT+Rep          |        |            | MT+Rep          |
| Förstärkt                             | Krympning, utsmältning       |                 |        |            |                 |            |        |                 |        |            |                 |
| Kylflödet för Angivaren               |                              |                 |        |            |                 |            |        |                 |        |            |                 |
| Leaning Dom + Coesia                  | Korrosion, erosion           |                 |        |            | End             | End        | End    | End             | End    | End        | End             |
| Värmeväxlar / Coesia                  | Korrosion, utsmältning       |                 |        |            | TS              | TS         | TS     | TS              | TS     | TS         | TS              |

## Bilaga 3.1-6 Provningsprogram för ångsystem

Indelning av ångledningen i delar

Delning i flödesriktning

|             | 1999     | 2000 | 2001 | 2002     | 2003 | 2004 | 2005   | 2006 | 2007 | 2008     |
|-------------|----------|------|------|----------|------|------|--------|------|------|----------|
| F1          |          |      |      |          |      |      |        |      |      |          |
| V1          | MT+Rep   |      |      |          |      |      | MT+Rep |      |      |          |
| B1          |          |      |      |          |      |      |        |      |      |          |
| B2          | MT+Rep   |      |      | (MT+Rep) |      |      | MT+Rep |      |      | (MT+Rep) |
| B3          | (MT+Rep) |      |      | MT+Rep   |      |      |        |      |      |          |
| V2          |          |      |      |          |      |      |        |      |      |          |
| T1          | MT+Rep   |      |      | MT+Rep   |      |      | MT+Rep |      |      | MT+Rep   |
| V3          |          |      |      |          |      |      |        |      |      |          |
| B4          |          |      |      |          |      |      |        |      |      |          |
| B5          | MT+Rep   |      |      |          |      |      |        |      |      |          |
| B6          | MT+Rep   |      |      |          |      |      |        |      |      |          |
| V4          |          |      |      | (MT+Rep) |      |      |        |      |      |          |
| B7          |          |      |      |          |      |      |        |      |      |          |
| B8          |          |      |      | MT+Rep   |      |      |        |      |      |          |
| B9          |          |      |      | MT+Rep   |      |      |        |      |      |          |
| B10         |          |      |      |          |      |      | MT+Rep |      |      |          |
| B11         |          |      |      |          |      |      | MT+Rep |      |      |          |
| Turbinfäste | MT+Rep   |      |      |          |      |      | MT+Rep |      |      |          |
| Dräneringar | End      |      |      |          |      |      | End    |      |      |          |

### FÖRKLARINGAR:

F1 = Formstycke i pannans högtrycksdel

V? = Ventil eller mätfläns

T? = T-stycke

B? = Böj

Raka delar inte uttagna

End Endoskopi

TS Tub prov

Rep Replika provning

MT Magnetpulverprovning

TM Tjockleksmätning

VT Visuell (okulär) inspektion

## Bilaga 3.1-7

## UTVÄRDERING KONDITION HÄSSELBY

## Pannan (se tabell i bilaga 8)

Indelning av pannans tryckkärl i komponenter för oförstörande provningsplanering  
 Delning enligt flödesriktning, vatten-ångproduktion.

|                                                 | Driftsbetingelse                          | 1999            | Utvärdering kondition (1-5) |
|-------------------------------------------------|-------------------------------------------|-----------------|-----------------------------|
| Högtrycksförvärmare                             | Korrosion                                 | VT              | 4                           |
| Matarvattenledning                              | Utmattningserosion                        | MT, TM          | 1                           |
| Economiser fördelningslåda                      | Utmattningserosion                        |                 |                             |
| Economiser (+ stödkonstruktion)                 | Utmattningserosion                        | VT, TM, MT      | 4(4)                        |
|                                                 | Varm del                                  |                 |                             |
|                                                 | Kall del                                  |                 |                             |
|                                                 | Väggar                                    |                 |                             |
| Economiser samlarlåda                           | Utmattningserosion                        |                 |                             |
| Eco - Dolezal                                   | Korrosion, erosion                        |                 |                             |
| Dolezal                                         | Korrosion, erosion                        | VT, TM, End     | 2                           |
| Dolezal - Dom                                   | Korrosion, erosion                        |                 |                             |
| Fällrör (16 st)                                 | Erosion, korrosion                        | TM              | 2                           |
| Fördelare för eldstadväggar (16 grenar)         | Korrosion                                 |                 |                             |
| Rör mellan huvudledning och fördelardor (16 st) | Korrosion                                 |                 |                             |
| Fördelarlådor för eldstadväggar (16 st)         | Korrosion                                 |                 |                             |
| Eldstadväggutuber                               | Int+ext korrosion, överhettning           | VT, TM, TS      |                             |
|                                                 | Bottentuber sneda                         |                 | 4                           |
|                                                 | Nedre frontvägg                           |                 |                             |
|                                                 | Nedre vänster vägg                        |                 |                             |
|                                                 | Nedre bakvägg                             |                 |                             |
|                                                 | Nedre höger vägg                          |                 | 2                           |
|                                                 | Övre frontvägg                            |                 |                             |
|                                                 | Övre vänster vägg                         |                 |                             |
|                                                 | Övre bakvägg                              |                 |                             |
|                                                 | Övre höger vägg                           |                 |                             |
| Samlingslådor väggutuber främre del (2 st)      | Utmattningserosion                        | VT, TM          |                             |
| Samlingslådor väggutuber, 'på taket' (2 st?)    | Utmattningserosion                        |                 |                             |
| Ledningar till domen                            | Utmattningserosion                        |                 |                             |
| Ångdom                                          | spänningskorrosion, korrosionsutmattnings | VT, MT          | 4                           |
| Ledning till ÖH 1 fördelarlåda                  | (Utmattningserosion)                      |                 |                             |
| ÖH 1 Fördelningslåda                            |                                           |                 |                             |
| ÖH 1 Pannutuber (tre delar)                     | Ext. korrosion, överhettning              |                 | 2                           |
|                                                 | Övre (Kall) del                           | VT, TM          |                             |
|                                                 | Nedre (Varm) del                          | VT, TM          |                             |
| ÖH 1 Samlingslåda                               | Utmattningserosion                        | End, MT         |                             |
| Ledning till Ångkylare                          | Utmattningserosion                        |                 |                             |
| Ångkylare                                       | Utmattningserosion                        | End, MT         | 2                           |
| Ledning till ÖH 2 fördelningslåda               | Utmattningserosion                        |                 |                             |
| ÖH 2 Fördelningslåda                            | Utmattningserosion                        | End, MT         |                             |
| ÖH 2 Pannutuber                                 | Ext. korrosion, krypning                  | VT, TM, TS      | 2                           |
|                                                 | Övre (varm) del                           | VT              |                             |
|                                                 | Nedre (Kall) del                          | VT, TM, TS      |                             |
| ÖH 2 Samlingslåda                               | Krypning, utmattnings                     | MT+Rep (40-60%) | 3                           |
| Ledning från samlare till förmstycke            | Krypning, utmattnings                     | MT+Rep          | 1                           |
| Förmestycke                                     | Krypning, utmattnings                     | MT+Rep          | 2                           |
| <b>Kylvatten för Ångkylaren</b>                 |                                           |                 |                             |
| Ledning Dom - Dolezal                           | Korrosion, erosion                        |                 |                             |
| Värmeväxlare i Dolezal                          | Korrosion, utmattnings                    |                 |                             |
| Ledning Dolezal - Kylare                        | Erosion                                   | TM              | 2                           |

## Bilaga 3.1-8

## UTVÄRDERING KONDITION HÄSSELBY

### Ängledning

Indelning av ängledningen i delar

| Delning i flödesriktning, raka delar ej medtagna |  | Provning T 999 | Utvärdering av kondition (1-5) |
|--------------------------------------------------|--|----------------|--------------------------------|
| F1                                               |  | MT+Rep         | 2                              |
| V1                                               |  | MT+Rep         | 1                              |
| B1                                               |  |                |                                |
| B2                                               |  | MT+Rep         | 1                              |
| B3                                               |  | MT+Rep         | 1                              |
| V2                                               |  |                |                                |
| T1                                               |  | MT+Rep         | 1 / 2, beroende på skarv       |
| V3                                               |  |                |                                |
| B4                                               |  | MT+Rep         | 1                              |
| B5                                               |  | MT+Rep         | 1                              |
| B6                                               |  |                |                                |
| V4                                               |  |                |                                |
| B7                                               |  |                |                                |
| B8                                               |  |                |                                |
| B9                                               |  |                |                                |
| B10                                              |  |                |                                |
| B11                                              |  |                |                                |
| Turbinfäste                                      |  | MT+Rep         | 1                              |
| Dräneringar                                      |  | End            |                                |

## FÖRKLARINGAR:

F = Formstycke  
 V = Ventil eller måtfäns  
 T = T-stycke  
 B = Böj

## Tidpunkt för nästa inspektion eller annan åtgärd

| Klass | Rörböj    | Annan komponent |
|-------|-----------|-----------------|
| 1     | > 5 år    | > 5 år          |
| 2     | 3 - 5 år  | 3 - 5 år        |
| 3     | 1 - 2 år  | 1 - 2 år        |
| 4     | max. ½ år | max. 1 år       |
| 5     | Byte      | Reparation      |

### 3.2 LIVSLÄNGDSANALYS AV EN ÅNGTURBIN I ETT KRAFTVÄRMEVERK

#### ABSTRACT

A guide for life time analyses of energy producing plants has been produced by Värmeforsk in Sweden. Based upon this guide ALSTOM Power Sweden AB has verified that the critical components can be identified, which need to be repaired or replaced in order to make it possible for the turbine owner to meet required reliability and availability.

#### SAMMANFATTNING

Till den andra utgåvan av "Handbok för livslängdsarbete med energianläggningar", i Värmeforsks regi har ALSTOM Power Sweden AB fått uppdraget att genomföra en pilotstudie avseende livslängdsarbete för en ångturbin. En värmeturbin vid Sydkraft MälarVärme AB i Örebro valdes som studieobjekt.

Arbetet utfördes baserat på EPRI:s flerstegsmetod. Detta är en av de i Livslängdshandboken omnämnda metoderna och den metod ALSTOM Power Sweden AB har erfarenhet av. Med EPRI:s flerstegsmetod inleds livslängdsanalysen från ett brett perspektiv med konservativa bedömningar varefter analyserna successivt förfinas och kompletteras där så bedöms nödvändigt. Teoretiska studier, såsom genomgång av turbinens historik och konstruktion, följs upp och/eller varvas med inspektioner, uppmätningar och materialundersökningar. Slutresultatet blir en bedömning av återstående livslängd av turbinens kritiska komponenter samt rekommendationer inför framtiden.

Livslängdsarbetet ger turbinägaren en bild av enskilda turbinkomponenters status. Med denna kunskap kan de komponenter identifieras vilka erfordrar reparationsinsats eller utbyte för att möjliggöra turbinägarens krav på drifttillgänglighet och drifttillförlitlighet.

#### SUMMARY

To the second edition of a guide for life time analyses, produced by Värmeforsk in Sweden, Alstom Power Sweden AB has been selected to verify the method described in this guide by conducting a life time assessment of a steam turbine. The usefulness of the method is also commented in the light of the present assessment. A district heating turbine, owned by Sydkraft MälarVärme AB and placed in Örebro in Sweden, was selected to be the object of the study.

According to EPRI's multistage strategy life time analysis is initiated on a broad front with conservative judgements. The analyses are gradually refined and supplemented where found necessary. Theoretical studies, such as review of turbine design and operating history, are followed up and combined with inspections, measurements and material analyses. The result is an estimation of components' remaining life time and recommendations for the future.

Life time analysis gives the owner a view of specific components condition. With this knowledge it is possible to identify components that need repair or replacement in order to meet the owner's demand for reliability and availability.

### 3.2.1 Inledning

#### 3.2.1.1 Bakgrund

Intresset för att bedöma återstående livslängd på energianläggningar ökar pga. att anläggningsbeståndet blir äldre och att allt fler anläggningar drivs längre än den livslängd anläggningen ursprungligen dimensionerades för. Dessutom finns ofta ett intresse av att modernisera anläggningar. Drivkrafterna för detta är undvikande av haveri samt optimering av anläggningen avseende ekonomi, t ex drift, underhåll, prestanda eller miljöpåverkan.

Ett behov har funnits avseende angreppssätt och struktur för hur anläggningsägare skall hantera livslängdsfrågor på ett systematiskt sätt. Utgående ifrån detta behov har Värmeforsk finansierat framtagande av en livslängdshandbok vilken skall vara en hjälp för anläggningsägare i livslängdsfrågor.

Efter att Livslängdshandboken har färdigställts har ALSTOM Power Sweden AB fått uppdraget att genomföra en pilotstudie avseende livslängdsarbete för en ångturbin. ALSTOM Power Sweden AB har sedan tidigare erfarenhet av livslängdsbedömningar på turbinanläggningar baserat på EPRIs flerstegsmodell, vilken är en av de metoder som beskrivs i Livslängdshandboken.

ALSTOM Power Sweden AB kommer fortsättningsvis, där det är möjligt, att skrivas enbart ALSTOM.

#### 3.2.1.2 Studieobjekt

Sydskraft MälarVärme AB har försökt att gå mot ett mer *konditionsbaserat* underhåll för turbinen. Som ett led i denna strategi inleddes ett livslängdsarbete tillsammans med ABB STAL AB, nuvarande ALSTOM Power Sweden AB, inför revisionen 1992, då turbinen varit i drift ca 70 000 h.

Den metodik som användes 1992 var ALSTOMs så kallade sex-steps-strategi som bygger på EPRIs flerstegsmetod. ALSTOMs tolkning av EPRIs metodik kan inrymmas i Livslängdshandbokens generellt definierade metoder och kommer därför inte att presenteras vidare i denna rapport.

Under revisionen 2001 har en implementering av livslängdsförlängande åtgärder samt en uppföljning av återstående livslängd utförts. I denna rapport beskrivs arbetet 1992 samt de fortsatta aktiviteter som genomförts under revisionsavställningen 2001.

Turbinen, med ordernummer B3501, som studerats är en värmeturbin på 110 MWel av sk TM typ levererad av STAL LAVAL, nuvarande ALSTOM Power Sweden AB, 1974. Idag ansvarar Sydkraft MälarVärme AB för turbinen. Turbinen är en partialreglerad impulsturbin med inloppsdata 535°C/138,3 bar. Fram till sommaren 2001 har turbinen varit i drift cirka 110 000 h samt ackumulerat drygt 300 starter.

#### 3.2.1.3 Syfte

Ångturbiner i kraft- alternativ kraftvärmeanläggningar är centrala anläggningsdelar med en dimensionerad livslängd på vanligtvis 100 000 till 200 000 h. Beroende på inloppsdata, körprofil, driftbetingelser etc. kan olika skademekanismer vara livslängdsstyrande. Utgående ifrån denna osäkerhet finns ofta ett långsiktigt behov att ha kunskap om var i anläggningen det erfordras åtgärder utgående ifrån ekonomisk optimering och/eller haveririsk.

Att genomföra ett livslängdsarbete innebär att anläggningsägaren kan koppla strategi och åtgärd till utfall utgående ifrån en kunskapsbas om anläggningens kondition och återstående livslängd på komponentnivå.

Finansiärer av denna utredning har varit Sydkraft MälarVärme AB, Värmeforsk och Birka Värme – alla med skilda syften med sitt deltagande.

- Målet med denna studie ur Värmeforsk perspektiv är att använda den struktur som tagits fram i Livslängdshandboken för en ångturbin och därmed få en pilotstudie för denna applikation. Dessutom skall studien ses som ett komplement till en tidigare genomförd pilotstudie på en ångpanna, se referens, då andra skademekanismer kommer att belysas här.
- Sydkraft MälarVärme AB genomför livslängdsanalysen som ett led i sin strategi avseende övergång till konditionsbaserat underhåll. Målet är att utifrån studien kunna bedöma riskerna med förlängda drifttider mellan de sk storrevisionerna.
- Målet för Birka Värme är att få insyn i projektet och därmed en djupare bas för ett eventuellt livslängdsarbete på den egna anläggningen vid Värtanverkets PFBC-anläggning.

#### 3.2.1.4 Avgränsningar

I inledningsskedet av en livslängdsanalys rangordnas anläggningsdelarna utgående ifrån någon kvalificerad metod, varefter fördjupade studier genomförs på de anläggningsdelar som befinns vara kritiska. Förutsättningen för detta arbete är att så redan har utförts och att turbinen identifierats som en kritisk anläggningsdel.

Analysnivån har varit sådan att den ur ett anläggningsägarperspektiv är rimlig att genomföra. Kostsamma analyser i syfte att erhålla mindre grad av konservatism har ej genomförts i inledningsskedet, allt enligt EPRIs flerstegsmetod.

Arbetet har varit fokuserat på själva livslängdsanalysen. Strategi och underhållsfilosofi hos Sydkraft MälarVärme AB, vilket har varit startpunkten för livslängdsarbetet, har inte beskrivits i detalj.

### 3.2.2 Metod

#### 3.2.2.1 Bakgrund

I denna sammanställningsrapport samlas Livslängdsanalys och Livslängdsprognos vid revisionerna 1992 och 2001 i en struktur med syftet att visa hur ett livslängdsarbete under återkommande revisioner kan genomföras. Basen i rapporteringen har varit att konsekvent använda den i Livslängdshandboken definierade nomenklaturen och strukturen.

#### 3.2.2.2 Teoretisk referensram

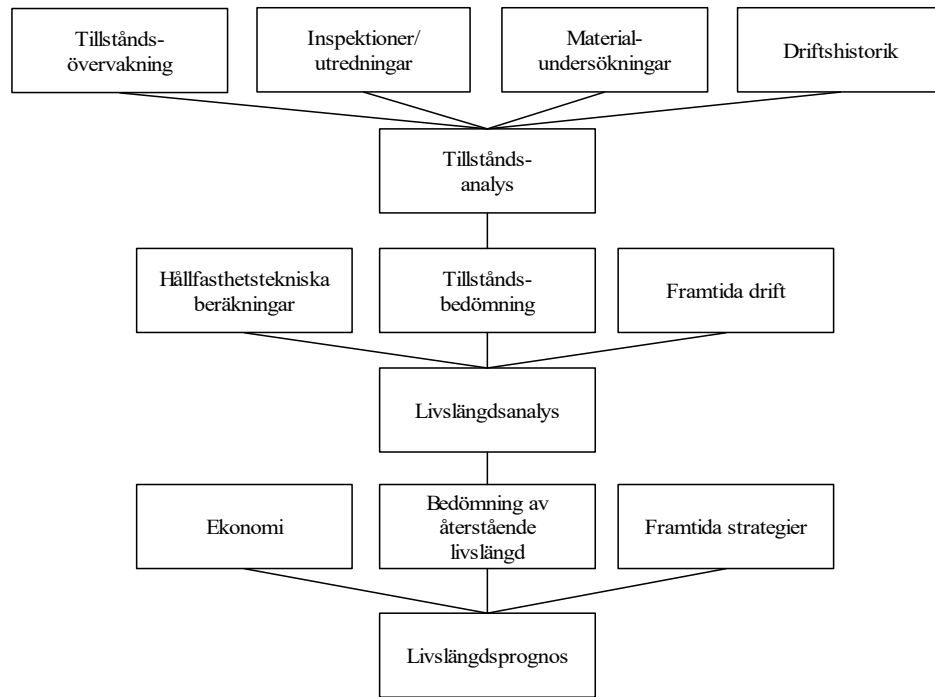
##### 3.2.2.2.1 Livslängdsarbete

Livslängdsarbetet har i regel två övergripande syften, säkerställa att haveri inte uppstår samt att optimera driften och underhåll. Dessa båda syften kan sedan brytas ned i ett stort antal ekonomiska och tekniska mål vilka är olika för olika anläggningar.

Ett ramverk för att koppla en komponents tillstånd till bedömning av återstående livslängd framgår av figur 1. För att bedöma en komponents återstående livslängd



erfordras kunskap om dess tillstånd, hållfasthetsbedömning/beräkning samt en prognos avseende framtida drift. För fördjupad information avseende livslängdarbetets struktur, se Livslängdshandboken.

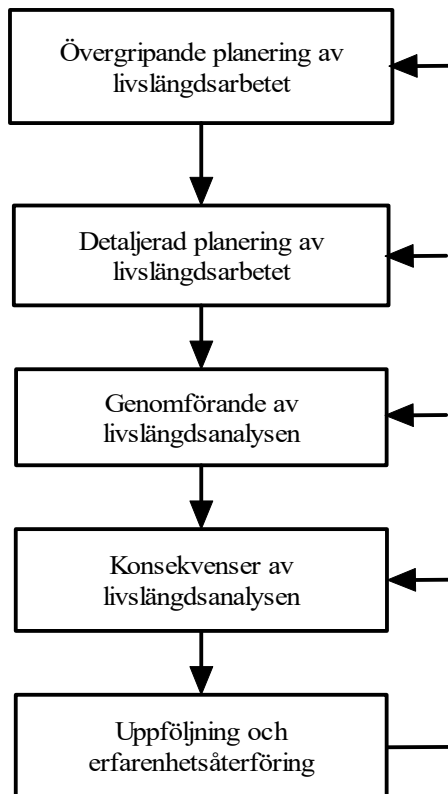


**Figur 1** Definition av livslängdsarbete i en energianläggning

**Figure 1** Definition of life management in power plant

#### 3.2.2.2.2 Arbetsprocess

En beskrivning av livslängdsarbetets arbetsprocess framgår av nedanstående flödesschema. Som det framgår av figur 2 präglas arbetet av en iterativ process där noggrannhet och säkerhet successivt förbättras. I den *övergripande planeringen av livslängdsarbetet* fastställs syfte, organisation och övergripande struktur för livslängdsarbetet. *Detaljerad planering av livslängdsarbetet* innebär ett insamlande av information, rankning av system, kostnadsuppskattning och en detaljerad plan. *Genomförande av livslängdsanalysen* innebär metodiskt bedömande av återstående livslängd kvantitativt eller kvalitativt. Under *Konsekvenser av livslängdsanalysen* fastställs om komponenten kan användas för fortsatt drift, om den skall repareras eller om komponentbyte erfordras. *Uppföljning och erfarenhetsåterföring* kan innebära rekommendation avseende förnyad inspektion.



**Figur 2** Flödesschema för livslängdsarbetet

**Figure 1** Life assessment process flow chart

### 3.2.2.2.3 Genomförande av livslängdsanalysen

Den del av arbetsprocessen som är den primära i denna rapport är *Genomförande av livslängdsanalysen*. En ytterligare fördjupning av den teoretiska modell som valts följer härmed.

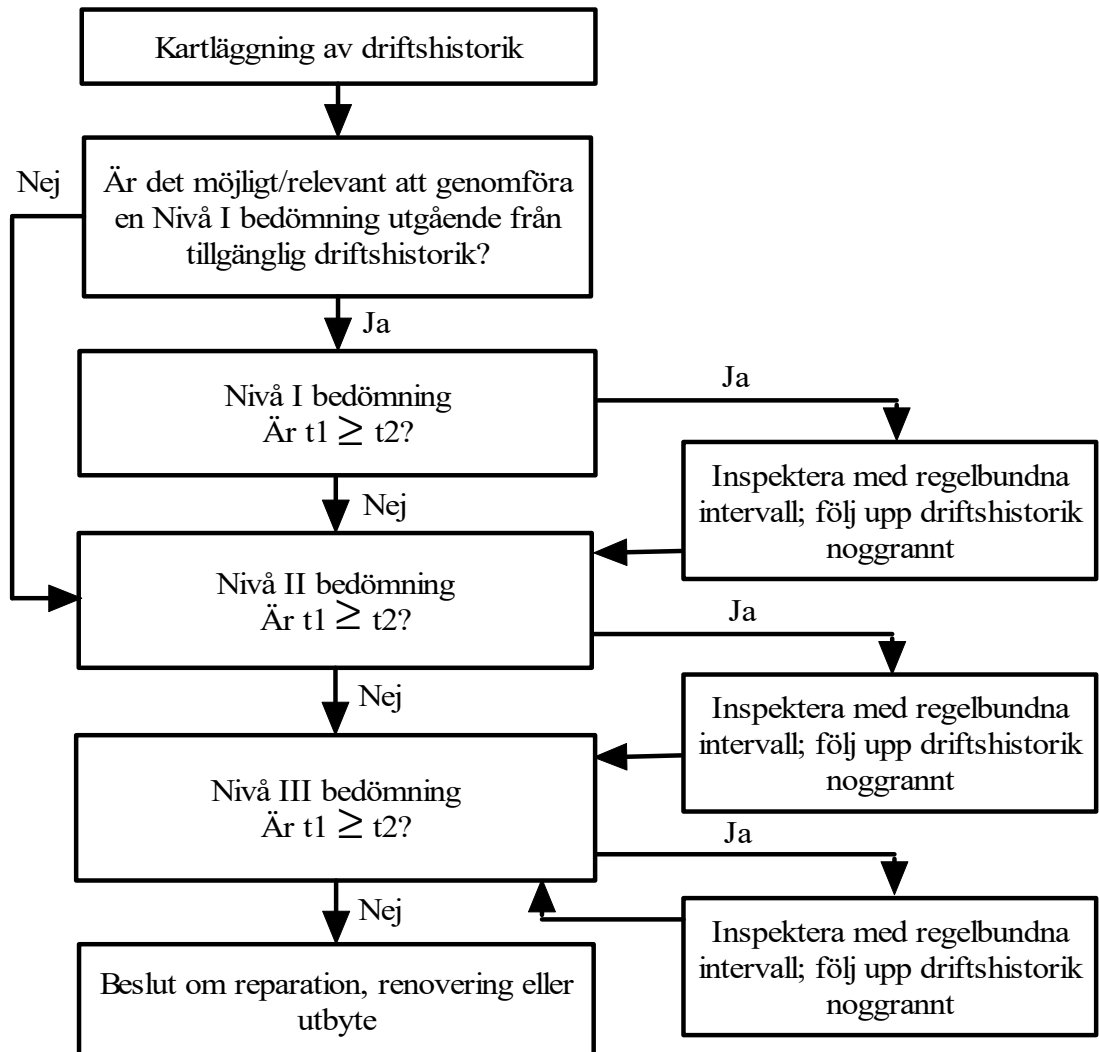
Bedömning av en komponents tillstånd och dess återstående livslängd kan genomföras med olika metoder. En metod som är användbar för energianläggningar är EPRIs s k tre-nivå-modell, se figur 4. Exempel på nödvändiga data för olika nivåer framgår av figur 3.

EPRIs tre-nivå-modell innebär att analysen inleds med konservativa bedömningar som successivt förfinas där så bedöms nödvändigt. Livslängdsanalysen bedrivs därmed på ett kostnadseffektivt sätt.

|                               | <b>Nivå 1</b>                                                 | <b>Nivå 2</b>                        | <b>Nivå 3</b>                  |
|-------------------------------|---------------------------------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------|
| <b>Detaljeringsnivå</b>       | Minst                                                         | Mer                                  | Mest                           |
| <b>Haverihistorik</b>         | Enligt protokoll                                              | Enligt protokoll                     | Enligt protokoll               |
| <b>Dimensioner</b>            | Design eller nominella                                        | Nominella eller uppmätta             | Uppmätta                       |
| <b>Komponentens tillstånd</b> | Protokoll från tidigare inspektioner/provning eller nominella | Inspektion/provning                  | Detaljerad inspektion/provning |
| <b>Temperatur och tryck</b>   | Baserade på design eller driftdata                            | Baserade på driftdata eller uppmätta | Uppmätta                       |
| <b>Spänningar</b>             | Baserade på design eller driftdata                            | Enkla beräkningar                    | Detaljerade beräkningar        |
| <b>Material-egenskaper</b>    | Minvärde                                                      | Minvärde                             | Aktuellt material              |
| <b>Krav på materialuttag</b>  | Nej                                                           | Nej                                  | Ja                             |

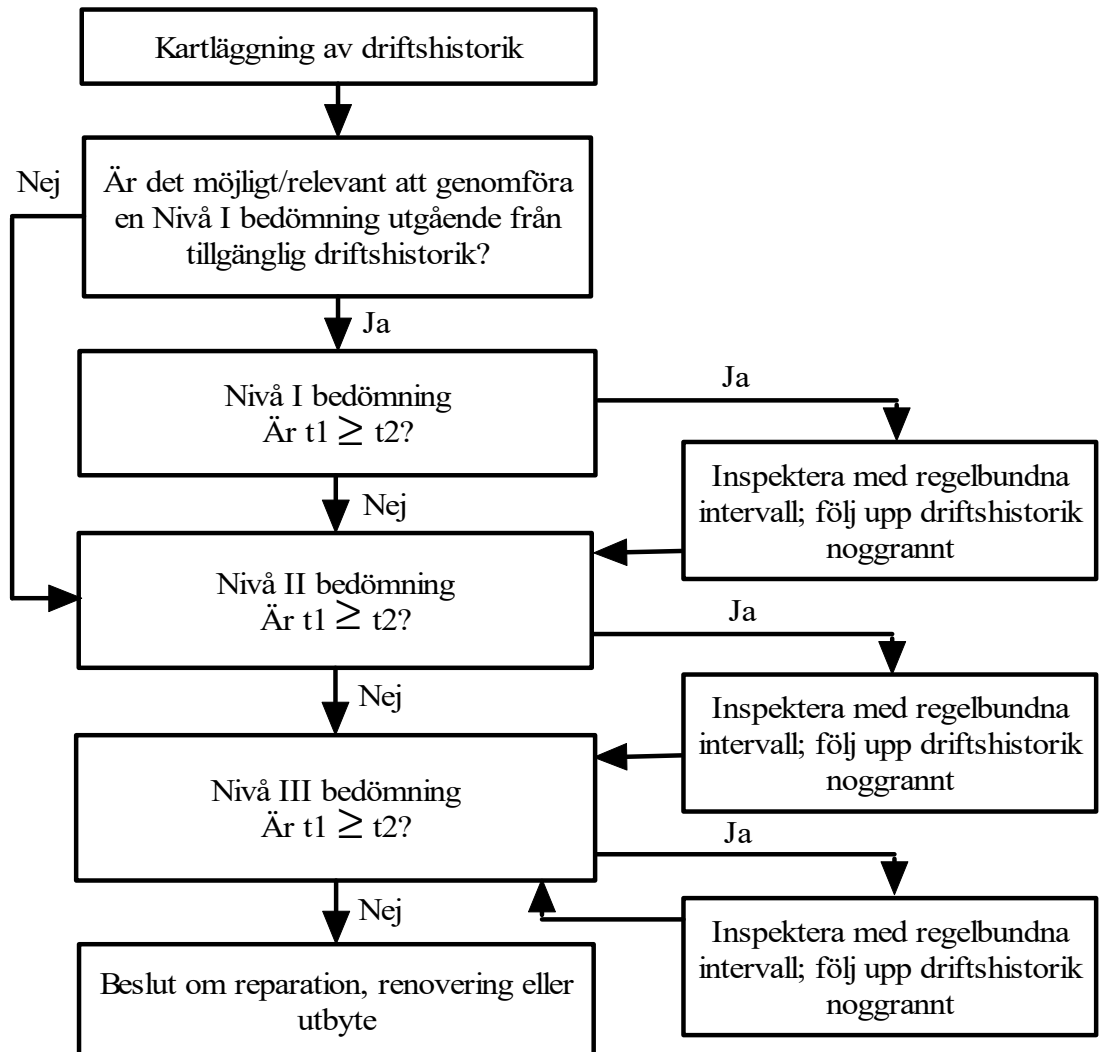
**Figur 3**                      **Nödvändiga data för olika nivå på bedömning av återstående livslängd enligt EPRI CS-4778**

**Figure 3**                    **Necessary input in three levels for remaining life estimation according to EPRI CS-4778**



$t_1$  = återstående livslängd med betryggande säkerhet

$t_2$  = drifttid till nästa bedömning av återstående livslängd



$t_1$  = återstående livslängd med betryggande säkerhet

$t_2$  = drifttid till nästa bedömning av återstående livslängd

Figur 4 Generisk procedur för bedömning av återstående livslängd enligt EPRI CS-4778.

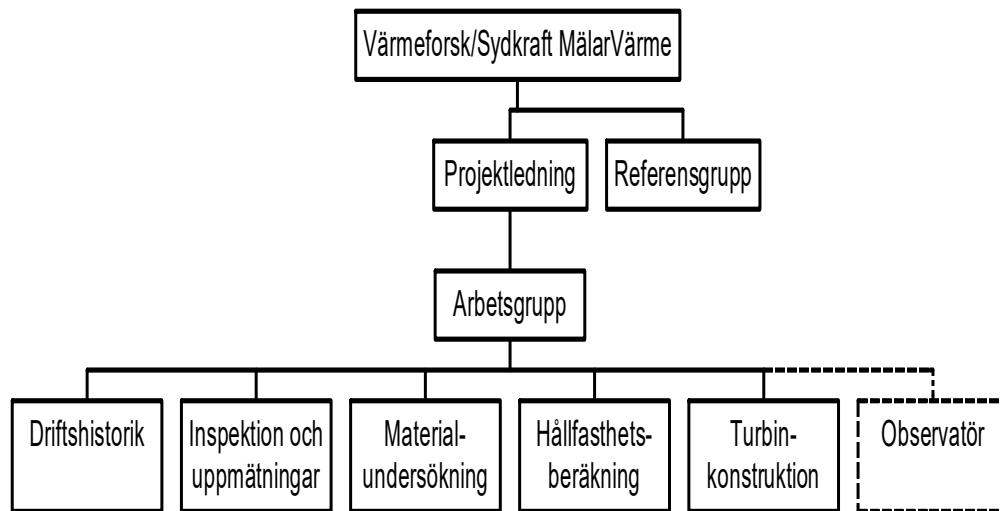
Figure 4 Generic procedure for component life assessment according to EPRI CS-4778.

### 3.2.2.3 Arbetsprocess Örebro Livslängdsarbete 1992 till 2001

En teoretisk beskrivning av livslängdsarbetets arbetsprocess framgår av kapitel 2.1 och 2.2. För livslängdsarbetet av rubricerad kraftvärmeturbin har samma byggstenar använts men i en annan ordning p g a att en redan genomförd analys från 1992 har sammanförts med det livslängdsarbete som utförts under revisionsavställningen år 2001.

1. **"Övergripande planering av livslängdsarbetet" och "Detaljerad planering av livslängdsarbetet". (Kapitel 2 - 4)** Detta arbete börjar i Sydkraft MälarVärmes strategiprocess. Mål för anläggningen fastställs och verktyg för att nå målen utvärderas. Leverantör och organisation för arbetet fastställs. Denna fas redovisas inte i detalj då detta sannolikt varierar mellan olika energianläggningar.
2. **"Genomförande av Livslängdsanalysen" med kartläggning av grunddata för tillståndskontroll 1974-2001 (Kapitel 5, 6 och 7)** I denna del samlas drifthistorik och komponenthistorik in baserat på tidigare genomförda underhållsaktiviteter, inspektioner, utredningar etc. Informationen fanns hos Sydkraft MälarVärme AB samt hos ALSTOM. (För den aktuella turbinen har 30 hyllmeter arkiverats innehållande konstruktionsunderlag, rapporter i servicefasen och affärs-korrespondens). I denna fas identifieras de komponenter som man avser att studera i Livslängdsanalys enligt EPRI nivå 2.
3. **"Genomförande av Livslängdsanalysen 1992." (Kapitel 8.1-8.3)** Bedömning av återstående livslängd genomfördes genom analys av tillståndskontroll, kompletterande hållfasthetsberäkningar, inspektionsaktiviteter och materialundersökning.
4. **"Konsekvenser av livslängdsanalysen 1992." (Kapitel 8.4-8.5)** Detta innebär att rekommendationer ges utgående ifrån livslängdsbedömning samt de framtida strategierna avseende optimering av anläggning och haveririsk.
5. **"Genomförande av Livslängdsanalys 2001" (Kapitel 9.1 - 9.2)** Se beskrivning för 1992 ovan.
6. **"Konsekvenser av livslängdsanalysen 2001" (Kapitel 9.3- 9.4)** Se beskrivning för 1992 ovan.
7. **"Uppföljning av utbytta komponenter 2001" (Kapitel 9.5)** Detta kapitel behandlar de undersökningar som gjordes på utbytta komponenter.
8. **"Slutsatser" och "Erfarenheter" (Kapitel 10 och 11)** I dessa kapitel diskuteras resultatet och rekommendationer avseende framtiden för B3501. Dessutom diskuteras metoden för analysen och erfarenheter ges till andra anläggningsägare som står i begrepp att inleda ett livslängdsarbete.

### 3.2.3 ORGANISATION



**Figur 5** Organisation  
Figure 5 Organisation

I arbetsgruppen har följande personer ingått:

|                            |                                           |
|----------------------------|-------------------------------------------|
| Driftshistorik:            | Mats Häll, Sydkraft MälarVärme AB         |
| Inspektion och uppmätning: | Rolf Hjalte, ALSTOM Power Sweden AB       |
| Materialundersökning:      | Fredrik Karlsson, ALSTOM Power Sweden AB  |
| Hållfasthetsberäkning:     | Anna Samuelsson, ALSTOM Power Sweden AB   |
| Turbinkonstruktion:        | Jan-Erik Eriksson, ALSTOM Power Sweden AB |

|             |                                   |
|-------------|-----------------------------------|
| Observatör: | Peter Isaksson, Birka Service     |
|             | Lennart Fagerström, Birka Service |

I referensgruppen har följande personer ingått:

Claes Nygren, Birka Värme  
Timo Vuorinen, Fortum  
Henrik Andersson, ALSTOM Power Sweden AB

### 3.2.4 STRATEGI

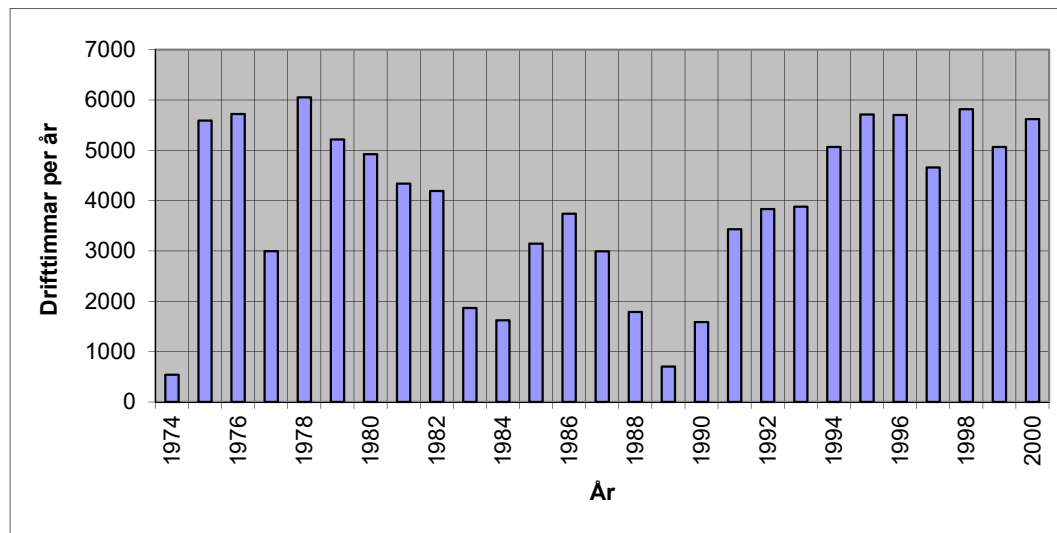
Sydkraft MälarVärme AB har som strategi att gå mot ett mer konditionsbaserat underhåll för sin värmeturbin B3501 i Örebro. Som ett led i denna strategi påbörjades vid storrevisionen 1992 ett livslängdsarbete med ett uttalat mål att öka tiden mellan stora revisioner samt att fastställa återstående livslängd. Livslängdsarbetet skulle vara återkommande så att man vid varje storrevision erhåller en bild av status på de kritiska komponenterna i turbinen. Utgående ifrån denna kunskap kan man identifiera de komponenter som erfordrar reparationsinsats eller utbyte för att möjliggöra det revisionsintervall som anläggningsägaren satt som mål för analysen.



### 3.2.5 DRIFTHISTORIK

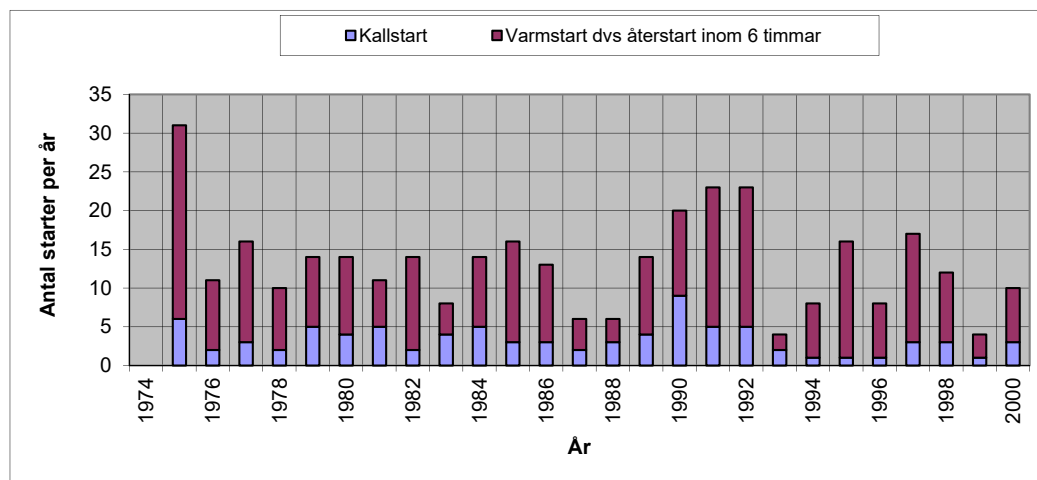
Turbinen togs i drift 1974 och vid utgången av år 2000 uppgick det totala antalet drifttimmar till nästan 109 000. Turbinen hade under samma tidsperiod startats cirka 342 gånger varav 87 gånger från kallt tillstånd. Den årliga drifttiden har varierat under årens lopp. I slutet av 1970-talet utnyttjades turbinen årligen mellan 5000 och 6000 timmar per år. Under 1980 minskade nyttjandegraden och var 1989 så låg som 703 timmar. I början av 1990-talet ökade åter den årliga drifttiden och har under de senaste åren stadigt legat kring 5000 timmar. Drifttiden förväntas bli oförändrad den närmaste 10-årsperioden. Se figur 6 och 7. Medeleffekten under årens lopp har varit 65 MW.

För utförligare information se även Appendix A.



Figur 6 Antal drifttimmar per år mellan 1974 och 2000

Figure 6 Number of operating hour between 1974 and 2000



Figur 7 Antal starter per år mellan 1975 och 2001

Figure 7 Number of starts between 1975 and 2001

### 3.2.6 KOMPONENTHISTORIK

För att kunna identifiera anläggningens potentiellt kritiska komponenter är det viktigt att turbinens historia finns väl dokumenterad.

Vid inspektioner och revisioner har personal från ALSTOM anlåtats, vilket innebär att det finns mycket information sparad i arkiven i Finspång. Inspektionerna har i möjligaste mån utförts av samma personer för att säkerställa att bedömningarna ska bli jämförbara från år till år. Uppmätningar m m har alltid skett enligt samma rutiner för att också dessa ska vara jämförbara. De beräkningar och erfarenheter som ligger till grund för de rekommendationer som givits finns också väl dokumenterade hos ALSTOM. Detta ger en bra grund för livslängdsbedömningen.

Stora revisioner har skett åren 1984, 1992 och 2001. Då demonterades hela turbinen. Komponenterna inspekterades grundligt, sprickundersöktes, mättes upp och strukturundersökning genomfördes. Däremellan har årliga kontroller av ventiler, lager m m skett. Fiberoptikinspektionen har också utförts årligen genom startsonden, ett hål före steg 1 i MT-turbinen och i turbinavloppet.

En utförlig komponenthistorik finns i ett separat dokument, vilket inte redovisas i denna rapport. Nedan följer några av de mest intressanta iakttagelserna. Relevant historik ur livslängdssynpunkt redovisas även i de kommande kapitlen.

Vissa komponenter har varit föremål för fler analyser än andra. *Innerhuset* i högtrycksturbinen och den *främre axeltätningshållaren* är exempel på sådana komponenter. Båda har en tendens att bli ovala och har därför noggrant studerats vid varje revision. Vid revision 2001 utfördes omfattande reparation av innerhuset och den främre axeltätningshållaren byttes ut mot en med styvare struktur.

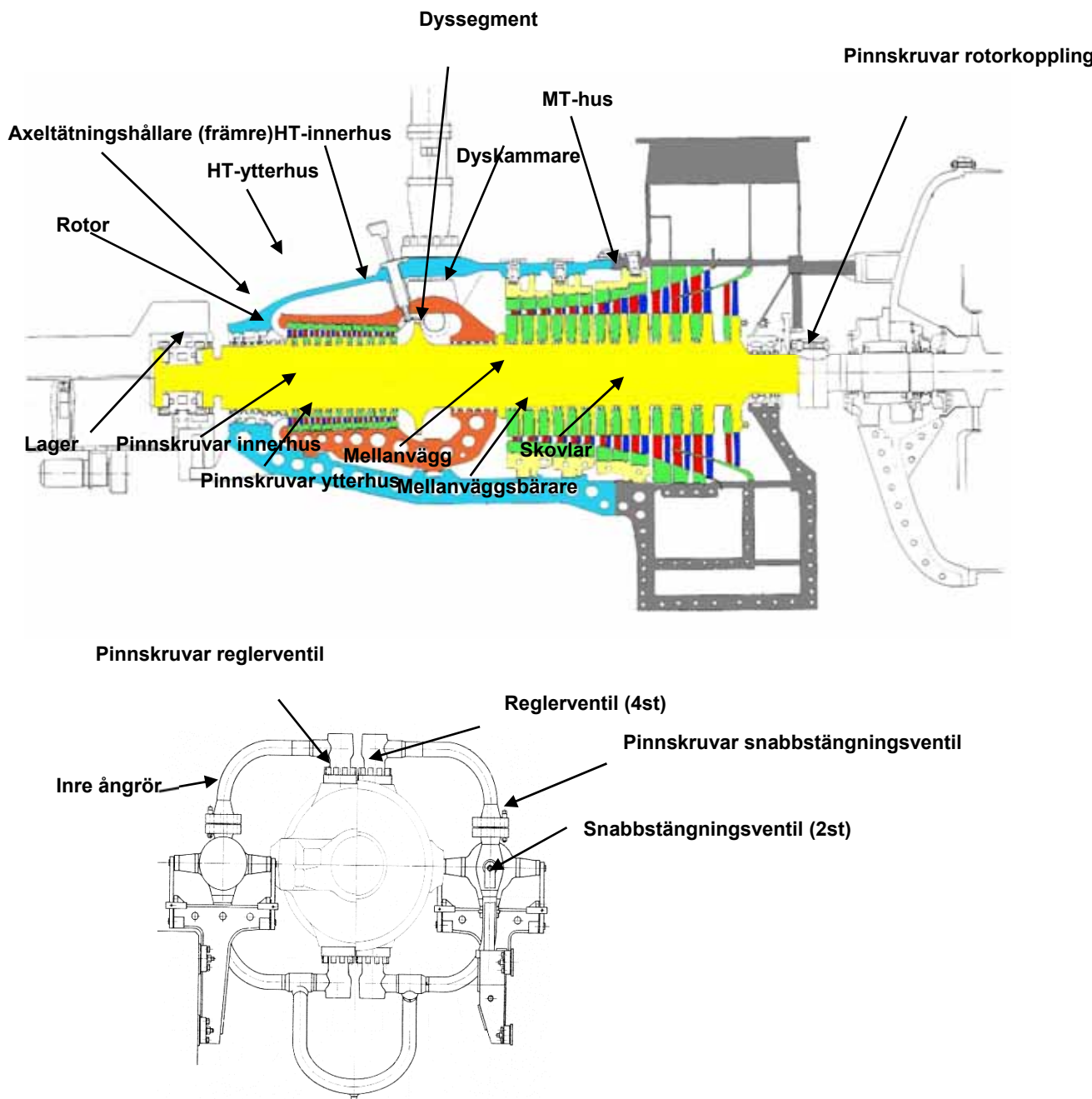
*Lagren* är andra exempel på komponenter som ofta varit föremål för inspektioner och uppmätningar. Turbinen har nämligen visat sig vara vibrationskänslig. Lager 1, det kombinerade axial- och radiallagret, modifierades under de första åren. År 1985 modifierades även lager 3, det bakre generatorlagret, genom att ett squeezelager monterades in. Vibrationerna vid fullast kvarstod dock. År 1994 levereras ett nytt lager 1 där en squeezeilmåmpare införts i axiallagrets radialdel. Även lager 3 modifierades då. Vibrationerna vid fullast sjönk till en acceptabel nivå, men något förhöjda vibrationer vid låglast uppstod.

Något som på senare år uppmärksammats i större utsträckning än tidigare är *erosions-korrosionsskador*. Ett omfattande arbete har utförts av ALSTOM för att fastställa uppkomsten av erosions-korrosion och utveckla förebyggande åtgärder för dessa. Redan vid revisionen 1992 fanns erosions-korrosionsskador som svetsreparerades lokalt. Vid årets revision har omfattande reparationer och förebyggande åtgärder utförts.

Se även bilaga B Komponenthistorik.

### 3.2.7 POTENTIellt KRITISKA KOMPONENTER

Nedan markerade komponenter identifierades i inledningsfasen som potentiellt kritiska. Se figur 8.



Figur 8 Potentiellt kritiska komponenter  
Figure 8 Potentially critical components

### 3.2.8 LIVSLÄNGDSBEDÖMNING, EPRI Nivå 2 1992

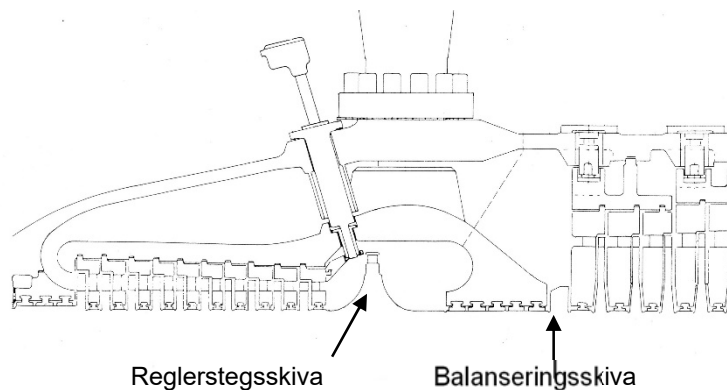
#### 3.2.8.1 Originalberäkningar

En genomgång av originalberäkningar för en specifik komponent kan ge värdefull information och vägledning om var kompletterande beräkningar bör utföras.

Har originalberäkningar utförts som helt följer dagens normer finns ingen anledning att lägga ner ytterligare beräkningsresurser på komponenten under förutsättning att komponenten inte vållat problem. Kompletterande beräkningar bör istället utföras på de komponenter som konstruerats i enlighet med någon materialnorm, som numera anses föråldrad, eller som inte beräknats alls då möjligheten till datorbaserade simulerings-möjligheter var starkt begränsad 1970 då turbinen konstruerades.

##### 3.2.8.1.1 Rotor

Vid konstruktionsskedet utfördes omfattande hållfasthetsanalyser av rotorn och bestämning av kritiska varvtal. Här presenteras de ursprungliga beräkningarna på de varmaste och mest kritiska delarna av rotorn – balanseringsskivan och reglerstegsskivan. Se figur 9.



**Figur 9** Rotor  
**Figure 9** Rotor

#### Balanseringsskivan

Analyserna av balanseringsskivan utfördes med FEM i två steg – en stationär temperaturanalys och en spänningsanalys.

Örebroturbinens speciella uppbyggnad med ångtillförsel mitt på rotorn, expansion mot ena änden genom HT-beskovlingen samt reverserad strömning genom MT-beskovlingen, medför att ett parti av rotorn mellan HT-turbinens innerhus och första mellanväggen i MT-delen exponeras för ånga av två markant skilda temperaturnivåer - 535°C respektive 350°C. Rotorn utsätts för en kraftig temperaturgradient i axiell riktning vilket i sin tur medför en lokalt hög spänningsnivå.

#### Reglerstegsskiva

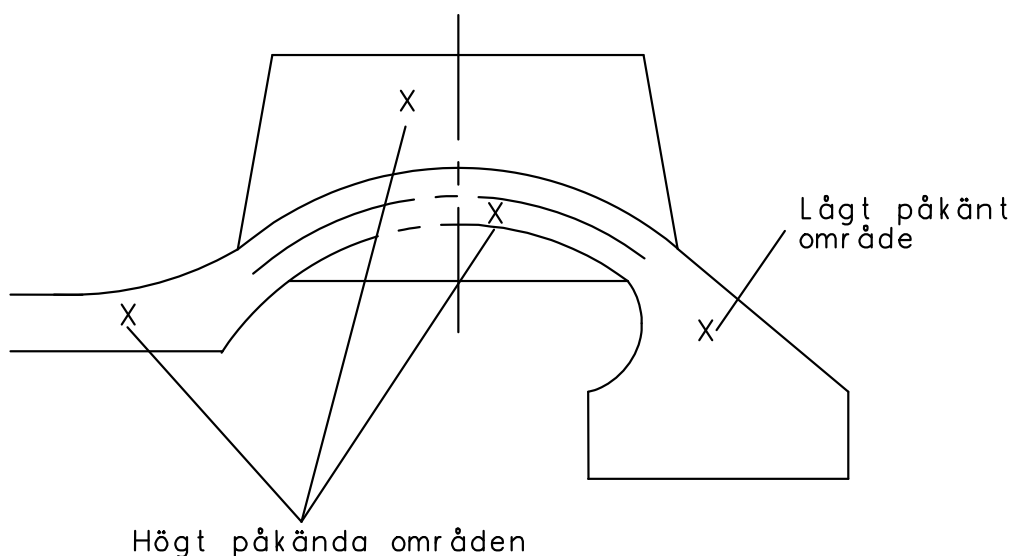
Spänningsberäkning utfördes även för reglerstegsskivan. Belastning p g a rotation samt stationär temperaturgradient studerades.

Beräkningarna var av överslagsmässig karaktär med dagens beräkningsmöjligheter, men fullt tillräckliga. Antalet starter bedömdes bli få och temperaturen hög vilket innebar att kryprisken blev dimensionerande i skivdelen. Skivans utformning visade sig vara mycket bra både vid betraktande av spänningskoncentrationer och spänning till följd av primärlaster, vilket reducerar risken för krypskador.

Reglersteget utsätts för excitation p g a delpådragen som kan ge höga dynamiska spänningsnivåer vid dellaster. Vid framtagandet av denna turbintyp studerades flera alternativa lösningar. EBW-svetsad skovelring som bågsvetsas mot rotorn valdes. Dimensioneringsberäkningar visade att 30 mm skovelbredd uppfyllde dimensionerings-kriterierna. För att ge en extra säkerhetsfaktor valdes 40 mm. Detta har visat sig vara en mycket bra lösning.

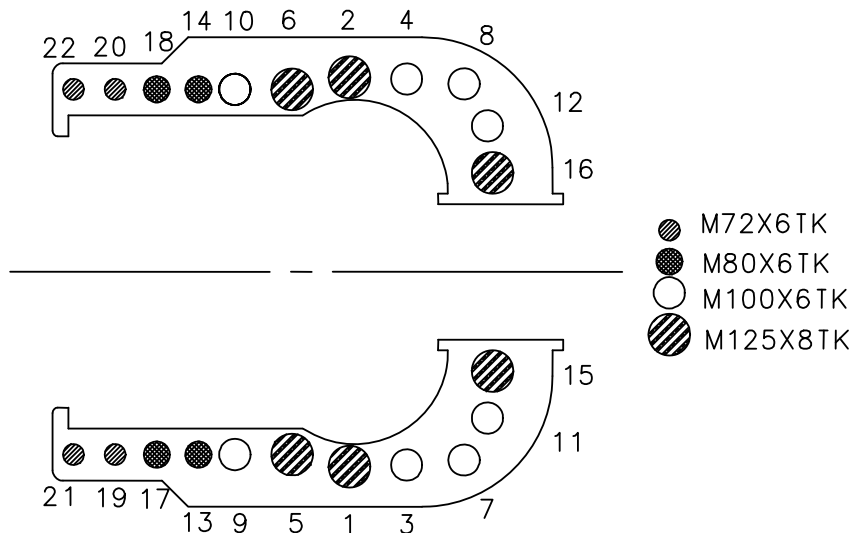
#### 3.2.8.1.2 HT innerhus och pinnskruvar

Delen vid inloppet är högst belastad varför beräkningar för pinnskruvar i denna del presenteras, se figur 10 nedan.



**Figur 10** Spänningsnivå i HT-innerhuset  
**Figure 10** Stress level in HP turbine casing

Beräkningar utfördes för samtliga pinnskruvar i inloppet t o m axeltätningsspartiet. Numreringen framgår av figur 11.



**Figur 11** Pinnskruvarnas numrering i HT-innerhuset  
**Figure 11** Numbering of studs in HP- turbine casing

Skruvspänningen,  $\sigma_{\text{skruv}}$ , beräknades som summan av kraften från tättytan och kraften från det inre övertrycket. Förbandet antogs vidare vara stelt varför dimensioneringskravet blev att förspänningen måste överstiga skruvkraften för att undvika risk för läckage. Vid konstruktionen 1971 användes kryprelaxationskurvor enligt BBC DK1102/7b. Dessa innebär att efter 3 år vid 430° C kvarstår en restspänning,  $\sigma_{\text{rest}}$ , på 219N/mm<sup>2</sup> för materialet i fråga (kallförspänning var 0.2%). Skruvspänningen tangerade detta värde för sex av pinnskruvarna. Se figur 12.

| Skruv nummer | $\sigma_{\text{skruv}}/\sigma_{\text{rest}}$ | Anmärkning                     |
|--------------|----------------------------------------------|--------------------------------|
| 1-2          | 100%                                         | Här tangeras tillåten spänning |
| 3-4          | < 50%                                        |                                |
| 5-6          | 100%                                         | Här tangeras tillåten spänning |
| 7-8          | < 50%                                        |                                |
| 9-10         | 83%                                          |                                |
| 11-12        | < 50%                                        |                                |
| 15-16        | 100%                                         | Här tangeras tillåten spänning |

**Figur 12** Spänningsnivå i HT-pinnskruvarna  
**Figure 12** Stress level in HP- turbine casing studs

### 3.2.8.2 Kompletterande beräkningar 1992

Kompletterande beräkningar utfördes för turbinrotorn, skovlarna, mellanväggarna, pinnskruvarna i HT-turbinens delningsplan, inre ångrör, reglerventiler och snabbstängningsventiler

#### 3.2.8.2.1 Rotor

Vibrationsnivån vid fullast har försämrats under åren. Förnyade böjsvängningsberäkningar utfördes för att utreda om stabiliteten skulle kunna ökas genom modifiering av befintlig dämpare. Den instabila moden visade sig dock ha mycket små utslag vid lager 3 vilket innebär att squeezedämparen som sitter vid detta lager inte avleder energi i önskvärd storleksordning.

Endast stationär spänningsanalys utfördes vid dimensionering av rotorn vilket innebär att spänningsamplituden blev svår att uppskatta. Med en faktor på 1.5 som kompensering för transienta effekter gav spänningsamplituden i den mest kritiska radien vid balanseringsskivan mer än 500 kallstarter till sprickinitiering.

#### 3.2.8.2.2 Skovlar och skovelfästningar

Dagens dimensioneringsprogram användes för beräkning av statiska spänningar i skovelns bottensnitt, foten och rotorskivan för en given geometri. Dimensionering, eller som i detta fallet kontroll, gjordes mot HCF, LCF, avdragning och avskjuvning samt maximalt yttryck i skovelfästningen. Samtliga skovlar visade sig vara lågt belastade.

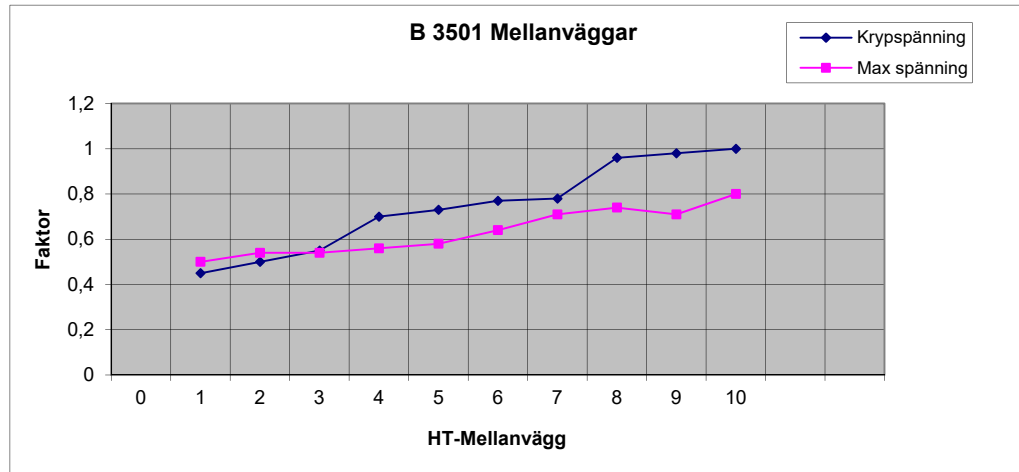
Skoveldynamiska beräkningar utfördes för steg MT7. Dessa påvisar att steget ligger mycket nära resonans vid störtalet 78 d v s det antal ledskenor som finns i mellanväggen uppströms.

#### 3.2.8.2.3 Mellanväggar

Mellanväggarna i HT-turbinen studerades med dagens dimensioneringsprogram. Nya dimensioneringsnormer har införts sedan B3501 tillverkades. Dessa kan kort beskrivas av att krypspänning dimensioneras mot krypbrottgränsen (105 h till brott) och maxspänningen dimensioneras mot sträckgränsen. Säkerhetsfaktorn bestäms av temperaturområde.



I figur 13 nedan redovisas den tillåtna spänning dividerat med beräknad spänning i ledskenorna vid fullast.



**Figur 13** Tillåten spänningsnivå / verklig spänningsnivå för HT-mellanväggarna

**Figure 13** Permitted stress level / actual stress level in HP-diaphragms.

För de tre första mellanväggarna redovisas resultatet för de gamla mellanväggarna som byttes vid revisionen 1992. Med de nya mellanväggarna hamnar faktorn kring 1 istället, vilket ju innebär en markant förbättring. Denna förbättring erhöles genom att ledskenebreddens ökades från 25 mm till 32 mm.

#### 3.2.8.2.4 Pinnskruvar - innerhus

Vid turbinens konstruktionsskede användes dåtidens kryprelaxationsdata. Utveckling inom materialområdet har skett sedan konstruktionsskedet och numera används DIN 17240, som efter 30 000 h vid 430°C ger en restspänning på 200 N/mm<sup>2</sup> för materialet i fråga. Kallförspänningen var 0.2 %. Skruvspänningen överskrider detta värde för sex pinnskruvar. Se figur 14.

| Skruv nummer | $\sigma_{skruv}/\sigma_{rest}$ | Anmärkning                        |
|--------------|--------------------------------|-----------------------------------|
| 1-2          | 110%                           | Här överskrider tillåten spänning |
| 3-4          | < 50%                          |                                   |
| 5-6          | 110%                           | Här överskrider tillåten spänning |
| 7-8          | < 50%                          |                                   |
| 9-10         | 91%                            |                                   |
| 11-12        | < 50%                          |                                   |
| 15-16        | 108%                           | Här överskrider tillåten spänning |

**Figur 14** Spänningsnivå i HT-pinnskruvarna

**Figure 14** Stresslevel in HP- turbine casing studs

#### 3.2.8.2.5 Inre ångrör, reglerventil och snabbstängningsventil

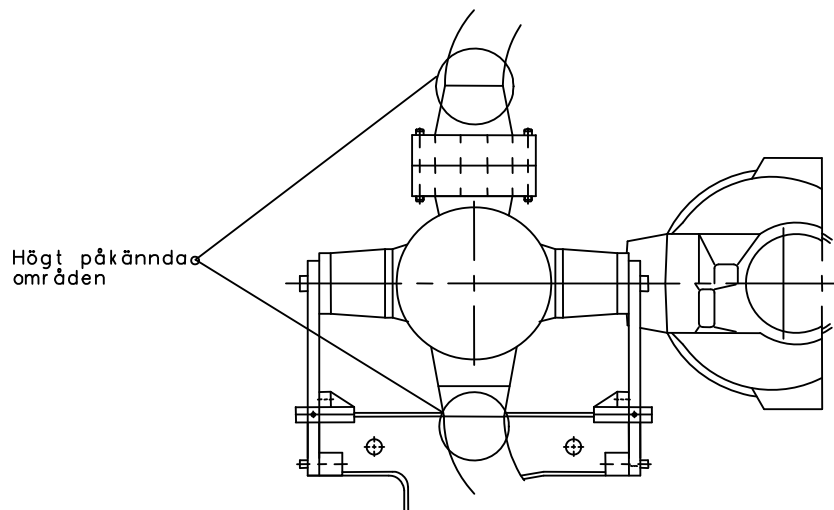
En modell av inre ångrör, reglerventiler och snabbstängningsventiler byggdes upp med hjälp av FEM. Modellen innefattade även anslutningar till fundament för att ge

konstruktionen så korrekta randvillkor som möjligt. Hela modellen byggdes upp av balkelement med varierande tvärsnittsdata. Materialet i modellen överensstämde med verkligt material. Turbinhusets radiella temperaturutvidgning vid fullast beaktades, men hänsyn till eventuella temperaturtransienter togs ej.

Rör och ventiler analyserades med generella beräkningsprogram. Programmet CAEDS användes för modellgenerering och utvärdering. Programmet ABAQUS användes för beräkning.

Spänningar till följd av kraftstyrda och rörelsestyrda laster studerades. Rörelsestyrda krafter orsakas av temperaturexpansion. De ger upphov till s k systemspänningar, vilka delvis relaxerar bort under stationär drift, men som samtidigt ger en överlagrad spänningsvariation. Med kraftstyrda laster avses inre övertryck och egenvikt.

Såväl reglerventiler som snabbstängningsventiler var lågt belastade. Den beräknade kryplivslängden för dessa komponenter översteg 200 000 timmar. Ångrören hade en något högre belastningsnivå. Dock översteg den beräknade kryplivslängden 200 000 timmar för större delen av rörsystemet. Lokalt mot snabbstängningsventilens bakre flänsar uppstod däremot höga spänningar. Här blev den beräknade kryplivslängden kortare än 100 000 timmar baserat på mindata (med medeldata avsevärt längre). En uppföljning med strukturundersökning rekommenderades därför på dessa positioner. Se figur 15.



**Figur 15** Högt påkända områden  
**Figure 15** Regions with highly stressed areas.

### 3.2.8.3 Inspektion och åtgärder 1992

#### 3.2.8.3.1 Rotor

Turbinrotorn fördes till Finspång för inspektion, planerade åtgärder och eventuella tilläggsåtgärder utgående ifrån inspektionsresultatet.

En lätt *skalning* noterades i rotorytans varmaste partier. På MT2-MT7 fanns rostbrun *beläggning* på rotorskivan medan det på steg MT8-MT10 istället uppträdde *erosionskorrosion* på rotorskivan.

En del *tätkantsslitage* kunde också konstateras. Tätkanterna i axeltätningsspartiet vid rotorerna ersattes av nya. Tätkanterna i rotoraxeln visade tecken på iskärning på steg HT1-HT3 och i reglerstegets skoveltak upptäcktes runtomgående spår från iskärning mot diskarnas två fasta tätkanter.

På samtliga skovlar i reglersteget fanns kraftiga *slagmärken*. Samtliga skador var dock gamla och observerades första gången vid storrevisionen 1984, men på grund av risk för sprickbildning vid en eventuell justering har inte någon sådan genomförts tidigare och genomfördes inte nu heller.

Strukturundersökning genomfördes på rotorerna inloppsparti och visade att strukturen var utan anmärkning.

#### 3.2.8.3.2 Skovlar

En del *beläggningar* fanns på skovlarnas ryggsida på steg HT1-MT7. Från MT8 avtog beläggningarna och ändrade karaktär beroende på fukthalten i ångan. På de bakre stegen uppträdde *vattendroppserosion*. På steg MT12 var dämptråden *brusten* på två ställen. En ny dämptråd där tråddiametern ökats från 4 mm till 5 mm monterades in. Detta bedömdes minska risken för ny sprickbildning. På övriga dämptrådsförsedda steg, d v s MT10-11 och MT13, var dämptråden utan anmärkning eller med ringa anmärkning. Samtliga byttes dock på kundens begäran.

Vid sprickundersökning upptäcktes en 14 mm lång *spricka* i en av skovlarna i MT7. Sprickan var belägen i avloppskanten mitt på skovelbladet. En ny skovel monterades och steget försågs med nya tätkanter i skoveltaket.

En del *tätkantsslitage* kunde konstateras. Tätkanterna i skovlarnas mittparti var kraftigt deformerade på steg MT11-13. Tätningarna i skoveltaket ersattes med nya pga. stort slitage på MT1-4.

Mycket kraftiga men "mjuka" *slagmärken* fanns på flertalet skovlar i MT1. Skadorna fanns redan vid revisionen 1984 och har inte förändrats sedan dess.

#### 3.2.8.3.3 Mellanväggar

En viss *deformation* kunde konstateras i samtliga HT-väggar. Mellanvägg HT1, HT2, HT3 och MT1 ersattes av nya. HT1 till HT3 byttes p g a att sprickor observerats vid tidigare fiberoptikinspektion samt den begränsade hållfasthet som kunde konstateras vid den kompletterande hållfasthetsanalysen av mellanväggarna, se **kapitel 3.2.8.2.3** MT1 byttes p g a kraftiga slagmärken som noterades 1984.

På steg MT2-MT10 fanns en del *beläggningar* som avlägsnades. *Erosionsskador* observerades på MT9-MT12. Vissa erosionsskador svetsreparerades medan andra mindre lämnades utan åtgärd.

För mellanvägg MT11 och MT12 fanns en del *indikationer i kälsvetsarna* i övergång mellan ledskenor och ringar. Mindre indikationer slipades ur, medan större svetsreparerades i Finspång.

#### 3.2.8.3.4 Mellanväggsbärare och MT-hus

Lokal svetsreparation av *erosionsskador* utfördes på mellanväggsbärare 2 och 3. I styrspår för mellanväggsbärare 3 och för mellanvägg MT10 samt i turbinhusets delningsplan utfördes också lokal reparation av erosionsskador.

## 3.2.8.3.5 HT-Innerhus

En lätt *skalning* i ytan noterades på innerhusets varmaste partier. Läckagestråk i husets delningsplan vid partiet för mitttätningen kunde också konstateras. Det kraftigaste läckaget var lokaliserat i den främre delen av tätningspartiet. Läckagebilden i husets delningsplan och slitagebilden på tätningar i hus och i rotor tydde på att huset var *ovalt och koniskt* vid tätningspartiet, vilket föranledde beslut om uppmätning. Uppmätning utfördes med odraget delningsplan och med bultar dragna till cirka halva förspänningen. Mätningarna bekräftade den misstänkta husdeformationen. Även förlängningsmätningen av delningsplanets bultar bekräftar detta. Bult 15 och 16 ersattes av nya bultar i nytt material med bättre relaxationsegenskaper, vilket betydde att läckaget efter en längre tids drift borde bli lägre än tidigare. Bult 14 byttes också mot ny p g a skadade gängor. Se **figur 11**.

Återdragningen blev en omständlig procedur med upp till fyra dragningar p g a husets deformation.

Strukturundersökning av innerhusets heta parti genomfördes utan anmärkning.

## 3.2.8.3.6 HT-Ytterhus

Uppmätning av styrdiametrar för främre axeltätningshållaren genomfördes. Samtliga mått var inom måttolerans.

## 3.2.8.3.7 Inre ångrör

Sprickundersökning och strukturundersökning utfördes utan anmärkning.

## 3.2.8.3.8 Reglerventil

Vid sprickundersökning av reglerventilernas komponenter erhöles en del *indikationer*. Någon reparerades genom svetsning, medan andra lämnades utan åtgärd. *Slitaget* på ventilspindeln i reglerventil vänster ner började närma sig gränsen för utbyte, medan den för reglerventil vänster upp redan hade överskridit utbytesgränsen. Denna spindel återmonterades dock eftersom reservdel saknades.

Strukturundersökning utfördes utan anmärkning.

## 3.2.8.3.9 Snabbstängningsventil

Ventilspindel med lock och kägla ersattes av ny i höger sidas snabbstängningsventil. Vid sprickundersökning observerades på inre delar i vänster sidas snabbstängningsventil en del linjära *indikationer i stellitpåläggen*. Indikationerna var så lokaliserade att risk för brott i stellten ej förelåg. Komponenterna är återmonterade utan åtgärd. Ångsilarna i båda snabbstängningsventilerna var kraftigt *bemängda med metallspån och andra partiklar*.

En strukturundersökning utfördes utan anmärkning.

## 3.2.8.3.10 Pinnskruvar – rotorkoppling

Pinnskruvarna längdmättes. Ingen nämnvärd kvarstående töjning sedan 1984 kunde noteras. Sprickundersökning utfördes till 100%, d v s hela ytan på samtliga pinnskruvar, utan anmärkning.

#### 3.2.8.3.11 Pinnskruvar – innerhus

Längdmätning utfördes på pinnskruvarna. Sedan revisionen 1984 har den *kvarstående töjningen* ökat med cirka 0.25 mm i de flesta bultarna – mindre i de bakre. Pinnskruv nummer 15 och 16 avvek dock markant från de övriga. I dessa två hade i stort sett hela förspänningstöjningen övergått i plastisk deformation. Dessa två pinnskruvar byttes ut mot nya i annat material. Även pinnskruv nummer 14 byttes ut men här var orsaken skadade gängor. Se **figur 11**.

Pinnskruvarna sprickundersöktes till 100% utan anmärkning.

#### 3.2.8.3.12 Pinnskruvar – ytterhus

Längdmätning av numrerade pinnskruvar utfördes. Ingen nämnvärd kvarstående töjning kunde noteras sedan revisionen 1984.

Pinnskruvarna sprickundersöktes till 100% utan anmärkning.

#### 3.2.8.3.13 Pinnskruvar – reglerventil

Pinnskruvarna sprickundersöktes till 100% utan anmärkning

#### 3.2.8.3.14 Pinnskruvar –snabbstängningsventiler

Pinnskruvarna sprickundersöktes till 100% utan anmärkning

#### 3.2.8.3.15 Dyssegment

Ett mycket kraftigt *slitage* orsakat av fasta partiklar kunde konstateras på ett antal ledskenor i dysorna placerade höger upp och vänster ner (de två korta), d v s de två som öppnar först. Slitaget fanns till övervägande del på de skenor som ligger längst från inloppet och är lokaliserat på skenans insida och ut mot avloppskanten. Dysorna placerade vänster upp och höger ner var däremot i mycket gott skick. På samtliga ledskenor i alla fyra dysorna fanns ett stort antal små *slagmärken*. De två slitna dyssegmenten ersattes av nya.

#### 3.2.8.3.16 Dyskammare

Dyskamrarna demonterades ej ur innerhuset. Material hade *skalat* från dyskamrarnas yta. De två fasta indiktade tätkanterna som tätar över reglerstegets tak var delvis skadade. Kontroll av eventuell deformation av dyskamrarna vid infästningspartiet för dysorna utfördes. De två dyskamrarna där dyssegmentet demonterats mättes på ett antal ställen i infästningsöppningen. I de två dyskamrarna där dyssegmenten ej demonterades kontrollerades istället spelet mellan dyssegment och infästningsspår med bladmått. En svag tendens till större öppning i mitten än vid ändarna kunde observeras, vilket tyder på en *viss krypdeformation*.

#### 3.2.8.3.17 Axeltätningshållare

Den främre axeltätningshållaren var *deformerad* så att mindre mått erhöles horisontellt än vertikalt med ökande skillnad bakåt. Dessutom var överhalvan vidare än underhalvan vid delningsplanet, då underhalvan och överhalvan mättes var för sig. Tätkanterna i tätningssegmenten var slitna horisontellt, med ökande slitage bakåt. På grund av att hållarens deformation kvarstod även vid draget delningsplan fanns ingen anledning att byta tätningssegmenten. De gamla justerades och återmonterades.

Den bakre tätningshållaren var utan anmärkning.

#### 3.2.8.3.18 Lager

Vid ultraljudsundersökningen av lagren kontrollerades vidhäftningen mellan vitmetallen och grundmaterialet. Ett antal indikationer tydande på bindfel konstaterades. Lagren återmonterades utan åtgärd då de flesta indikationerna fanns i den obelastade överhalvan. En uppföljning vid nästa revision rekommenderades.

#### 3.2.8.4 Bedömning av återstående livslängd 1992

För att bedöma en komponents återstående livslängd erfordras kunskap om komponentens tillstånd, hållfasthetsbedömning/beräkning och en prognos avseende framtida drift. Vid beaktande av ovanstående utfördes klassificering enligt figur 16.

| Klass 1                    | Klass 2                | Klass 3                  |
|----------------------------|------------------------|--------------------------|
| Skovlar MT7                | Skovlar MT6, MT8-9     | Rotor                    |
| Mellanvägg MT7             | Mellanvägg HT8-10      | Övriga skovlar           |
| Mellanvägg HT4-7           | Inre ångrör            | Övriga mellanväggar      |
| HT-Innerhus                | Pinnskruvar – Innerhus | Reglerventilhus          |
| Främre axeltätningshållare | Dyssegment             | Snabbstängningsventilhus |
|                            | Lager                  | Ytterhus                 |
|                            | Mellanväggsbärare      | Övriga pinnskruvar       |
|                            | MT-hus                 | Dyskammare               |

Figur 16 Klassificering av komponenter 1992

Figure 16 Classification of turbine components in 1992.

Klass 1 har högst prioritet och omfattar de komponenter som på kort sikt bedöms kunna begränsa tillgängligheten. Komponenter i klass 2 bedöms kräva åtgärder på något längre sikt. Klass 3 hanteras enligt normala rutiner vid revision.

#### 3.2.8.4.1 Rotor

Vid beräkningarna framkom att antalet kallstarter var den begränsande skademekanismen. Eftersom turbinen endast har startats vid ett fåtal tillfällen per år och den oförstörande provningen utfördes utan anmärkning placerades rotorn i **klass 3**. Den skalning och erosions-korrosion som noterades vid inspektionen var av ringa omfattning.

#### 3.2.8.4.2 Skovlar

Statiska hållfasthetsberäkningar visade att skovlarna var lågt belastade.

Vid inspektionen upptäcktes en spricka i bakkanten på skovel MT7. Dynamiska beräkningar bekräftade närheten till resonans för skovelsteget. Beslut togs av kunden att enbart byta den spruckna skoveln. Hela steg MT7 placerades i **klass 1**. Vidare rekommenderades en skoveldynamisk analys av MT 6,8 och 9 för att fastställa avståndet till resonans för dessa steg. Originalberäkningarna visade att tillräckligt avstånd fanns, men viss osäkerhet fanns. Skovlarna placerades tillsvidare i **klass 2**. Övriga skovlar placerades i **klass 3**.

#### 3.2.8.4.3 Mellanväggar

Ingen av de ursprungliga mellanväggarna i HT-turbinen uppfyllde 1992 års beräkningsnorm. I de nya mellanväggarna HT1-3 har ledskenebredden ökat så att den aktuella normen uppfylldes. Mellanväggarna placerades därmed i **klass 3**. Mellanväggarna HT4-7 placerades i **klass 1** och mellanvägg HT8-10 placeras i **klass 2** baserat på hållfasthetsberäkning. Beroende på det dynamiska problemet i steg MT7 placerades mellanväggen i **klass 1** p g a. mellanväggens excitationssverkan på skovelsteget nedströms. Övriga mellanväggar placerades i **klass 3**.

#### 3.2.8.4.4 Mellanväggsbärare och MT-hus

Erosionsskador reparerades vid revisionen, men några förebyggande åtgärder utfördes ej. Komponenterna placerades därför i **klass 2**.

#### 3.2.8.4.5 HT-Innerhus

På grund av att orsaken till deformationen ej kunde fastställas placerades huset i **klass 1**.

#### 3.2.8.4.6 Ytterhus

Klassificeringen baserades uteslutande på inspektionsresultat. Vid inspektionen upptäcktes erosionsskador i mindre omfattning. Ytterhuset placerades dock i **klass 3**.

#### 3.2.8.4.7 Inre ångrör

Beräkningarna indikerade risk för krypskador. Såväl strukturundersökning som sprickundersökning genomfördes utan anmärkningar, varför de inre ångrören placerades i **klass 2**.

#### 3.2.8.4.8 Reglerventil

Beräkningar visade att kvarvarande livslängd för reglerventilhuset översteg 200 000 h. Såväl strukturundersökning som sprickundersökning genomfördes utan anmärkningar. Reglerventilhuset placerades i **klass 3**.

#### 3.2.8.4.9 Snabbstängningsventil

Beräkningar visade att kvarvarande livslängd för snabbstängningsventilhuset översteg 200 000 h. Såväl strukturundersökning som sprickundersökning genomfördes utan anmärkningar. Snabbstängningsventilhuset placerades i **klass 3**.

#### 3.2.8.4.10 Pinnskruvar rotorkoppling

Pinnskruvarna sprickundersöktes till 100% och längdmättes utan anmärkning vilket placerade dem i **klass 3**.

#### 3.2.8.4.11 Pinnskruvar – innerhus

Pinnskruv nr 15 och 16 byttes vid revisionen på grund av stor relaxation och att skruvar med bättre krypegenskaper erfordrades, se bl a 8.3.5. Enligt 1992 års norm var ett flertal pinnskruvar högt belastade varför de placerades i **klass 2**.



## 3.2.8.4.12 Pinnskruvar – reglerventil

Pinnskruvarna sprickundersöktes till 100% och längdmättes utan anmärkning vilket placerade dem i **klass 3**.

## 3.2.8.4.13 Pinnskruvar – snabbstängningsventil

Pinnskruvarna sprickundersöktes till 100% och längdmättes utan anmärkning vilket placerade dem i **klass 3**.

## 3.2.8.4.14 Pinnskruvar – ytterhus

Pinnskruvarna sprickundersöktes till 100% och längdmättes utan anmärkning vilket placerade dem i **klass 3**.

## 3.2.8.4.15 Dyssegment

Klassificeringen baserades uteslutande på inspektionsresultat. De kraftiga erosionsskadorna orsakade av fasta partiklar i ångan föranledde en rekommendation om att dyssegment alltid ska finnas i reserv vid revision. Dyssegmenten placerades i **klass 2**.

## 3.2.8.4.16 Dyskammare

Klassificeringen baserades uteslutande på inspektionsresultat. En svag tendens till större öppning i mitten än vid ändarna kunde observeras. Likaså kunde en lätt skalning noteras. Dyskamrarna klassificerades i **klass 3**.

## 3.2.8.4.17 Axeltätningshållare

Orsaken till deformationen var ej fastställd varför axeltätningshållaren placerades i **klass 1**.

## 3.2.8.4.18 Lager

Några originalberäkningar studerades inte. Turbinen har visat sig vara vibrationskänslig. Åtgärder har utförts och fler kan komma att behöva utföras.

Lagren placerades i **klass 2**.

### 3.2.8.5 Rekommendation om reparation och utbyte efter genomförd revision 1992

Följande rekommendationer gavs vid livslängdsundersökningen 1992. Se sammanställningen i figur 17 nedan.

| Komponent                                     | Rekommendation                                                                                                                         |
|-----------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Rotor                                         | Normal revision                                                                                                                        |
| Skovel MT7<br>MT6, MT8, MT9<br>Övriga         | Byts ut vid nästa tillfälle<br>Skovelvibrationsberäkning<br>Normal revision                                                            |
| Mellanvägg MT7, HT4-7<br><br>HT8-10<br>Övriga | Byt till nya mellanväggar. Ändra antal ledskenor före MT7-skoveln<br>Rekommendation fastställs efter nästa revision<br>Normal revision |
| Mellanväggsbärare och MT-hus                  | Normal revision                                                                                                                        |
| HT-innerhus och pinnskruvar                   | Förnyad uppmätning                                                                                                                     |
| Ytterhus                                      | Normal revision                                                                                                                        |
| Inre ångrör                                   | Förnyad undersökning med minst samma omfattning                                                                                        |
| Reglerventilhus                               | Förnyad undersökning med minst samma omfattning.                                                                                       |
| Snabbstängningsventilhus                      | Förnyad undersökning med minst samma omfattning.                                                                                       |
| Dyssegment                                    | Bör alltid finnas i reserv                                                                                                             |
| Dyskammare                                    | Normal revision                                                                                                                        |
| Främre axeltätningshållare                    | Utredning och åtgärd för att förhindra deformation                                                                                     |
| Lager                                         | Utredning och åtgärder för att förhindra vibrationsproblem                                                                             |
| Övriga pinnskruvar                            | Normal revision                                                                                                                        |

**Figur 17**      **Rekommendationer 1992**  
**Figure 17**    **Recommendations in 1992.**

## 3.2.9 LIVSLÄNGDSBEDÖMNING EPRI Nivå 2 2001

### 3.2.9.1 Kompletterande beräkningar 2001

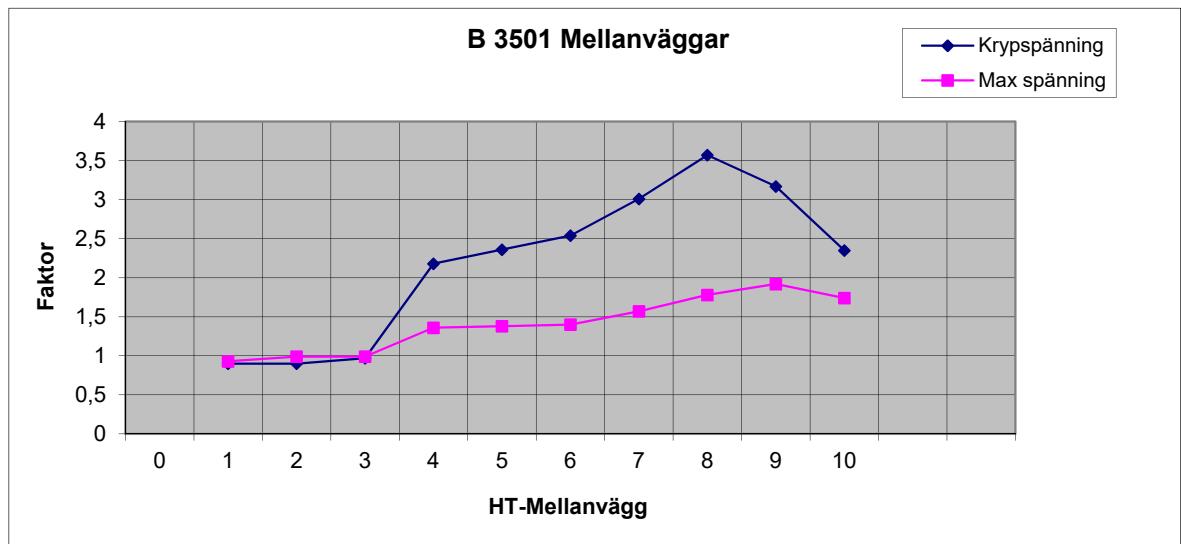
Kompletterande beräkningar utfördes på skovlar till MT6, 8 och 9, mellanväggar till HT4-10, HT-innerhuset och dess pinnskruvar och den främre axeltätningshållaren.

#### 3.2.9.1.1 Skovlar MT6, MT8 och MT9

Skoveldynamiska beräkningar utfördes för steg MT6, MT8 och MT9. För alla stegen uppfylldes våra normer beträffande avstånd till resonans. Beräkningen utfördes med anledning av den resonans som förelåg för steg MT7.

## 3.2.9.1.2 Mellanväggar HT4-10

Mellanväggarna dimensionerades enligt dagens dimensioneringskriterier. I figuren nedan redovisas tillåten spänning dividerat med erhållen spänning för ledskenor. Jämför gärna figur 18. Observera att säkerhetsmarginalen blev större för de mellanväggar som byttes ut vid revisionen 2001 (HT4-10) än för de som byttes ut 1992 (HT1-3). Orsaken till detta var att numera finns en profil att tillgå som ger lägre



påkänningar.

**Figur 18** Tillåten påkänning / verklig påkänning i HT-mellanväggarna  
**Figure 18** Permitted stresslevel / actual stresslevel in HP-diaphragms

## 3.2.9.1.3 HT-innerhus och dess pinnskruvar

Genom att studera en statisk FE-beräkning tidigare utförd på en liknande geometri insågs att ång- och temperaturkrafter inte själva kunde ge spänningar i den storleksordning som krävdes för plastisk deformation. Hindrades däremot den radiella utvidgningen i delningsplanet genom att det nöp i någon av styrningarna uppstod däremot höga spänningar. Dessa spänningar visade sig vara tillräckliga för att orsaka kryp eller plasticering.

För att analysera risken för nypning beräknades behovet av spel för uppläggningstassar under delningsplanet; se figur 24. Under start blir innerhuset och dess tassar fortare varmt än det mera värmetröga ytterhuset vilket innebär en risk för nypning om spelen inte är tillräckliga. Maximal temperaturdifferens bedömdes och resultatet blev att spelen ökades, dock inte så mycket att innerhusets möjliga rörelser äventyrar tätkanter eller ger upphov till andra risker.

Beräkningar utfördes också för att få en optimal förspänning i de nya pinnskruvarna som håller ihop hushalvorna. De nya pinnskruvarna försträcktes med hjälp av speciellt anpassade hydrauliska verktyg.

#### 3.2.9.1.4 Främre axeltätningshållaren

En ny konstruktion togs fram som har bättre förmåga att behålla rundhet under lång tid.

Huvudsakliga förbättringar är:

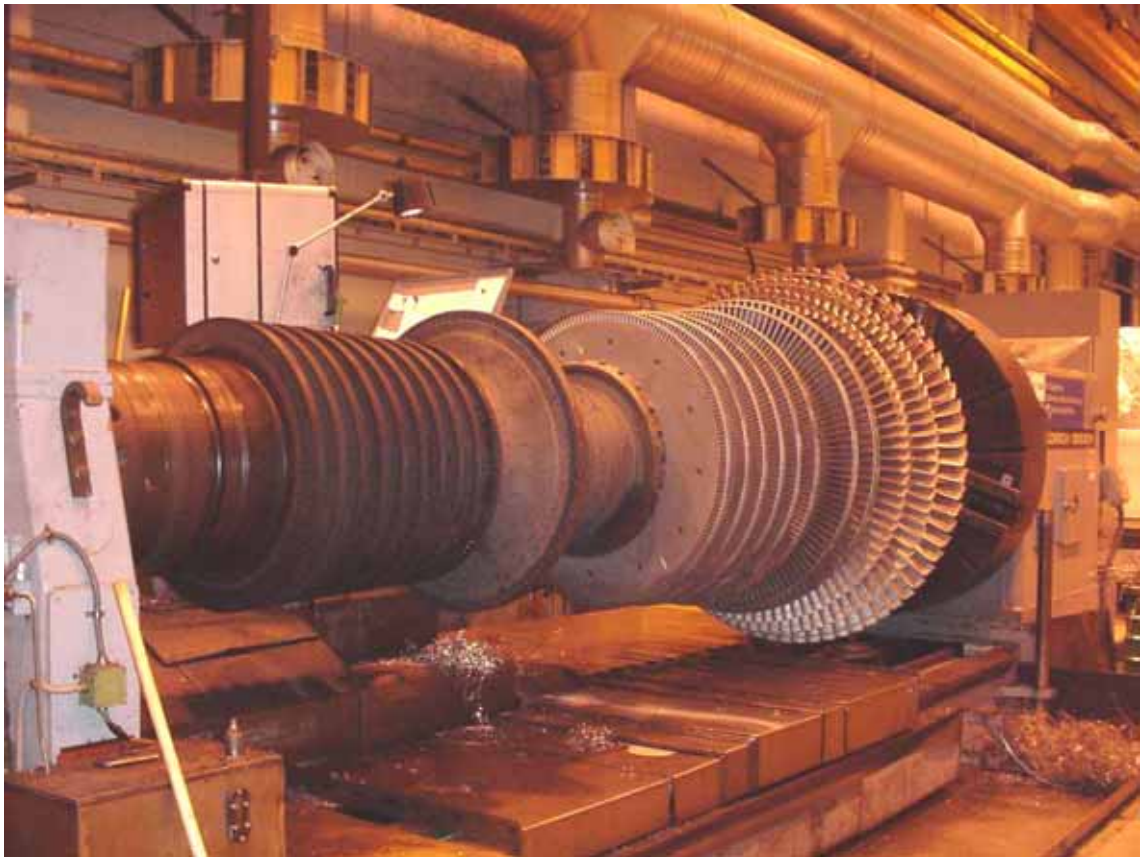
- Ökad styvhet genom att godstjockleken ökats i radiell led där så var möjligt
- Ökad diameter på pinnskruvarna i delningsplan
- Materialbyte till låglegerat (föret kolstål)

Allt detta medför att risken för krypskador minskar avsevärt. Eftersom godstjockleken ökades i radieled minskades vissa strömningsareor. Kompromissen mellan styvhet och strömningshastigheter är beräknad för att undvika extra tryckfall och ljudproblem.

#### 3.2.9.2 Inspektion och åtgärder 2001

##### 3.2.9.2.1 Rotor

Turbinrotorn fördes till Finspång för inspektion, planerade åtgärder och eventuella tilläggsåtgärder utgående från inspektionsresultaten. Fotot nedan visar rotorn på plats i Finspång. Se figur 19.



**Figur 19** Rotor i Finspång för bearbetning  
**Figure 19** The rotor in Finspång

*Skalningen* i rotorytan hade ökat i omfattning sedan revisionen 1992. Likaså hade *rostangreppen* ökat markant i hela MT-delen. På rotorskivan fanns korrosions-angrepp orsakade av stilleståndskorrosion på steg HT2-HT10 och MT1-MT9. Radie-övergångarna mot skivan var angripna av *erosions-korrosion* på steg MT9-MT12. Samtliga skovelfästningar i MT-delen var angripna av *korrosion*.

De roterande tätkanterna i mittre axeltättningspartiet hade en markant *förslitning*. Likaså var tätkanterna på rotoraxeln i HT-delen och vid den främre axeltättningshållaren slitna. Samtliga byttes. De runtomgående spår i reglerstegets skoveltak från iskärning mot dyskammrarnas två fasta tätkanter hade inte förvärrats sedan föregående revision 1992.

Nu fanns också iskärningar i axeln i det mittre axeltättningspartiet från de stationära tättningssegmenten. De *slagmärken* som noterades på skovlarna i reglersteget vid revisionen 1984 hade inte förändrats.

Hårdhetsmätning visade att hårdheten låg inom mättolerans på i stort sett alla mätpunkterna. Strukturundersökningen utfördes utan anmärkning.

Det gjordes en komplett ny balansering där alla gamla vikter togs bort. Resultatet blev mycket bra. Restobalansen efter balanseringen var bara en bråkdel av vad normer tillåter. Efter detta utfördes rusningsprov vid 20% övervarv under 3 min.

#### 3.2.9.2.2 Skovlar

Lätt till måttlig *beläggning* fanns på skovlarnas ryggsida på steg HT1-MT7. Från MT8 avtog beläggningarna och ändrade karaktär beroende på fukthalten i ångan. *Vattendroppserosion* fanns på skovlarnas inloppskant i yttre delen av bladet i de bakre stegen. Dämptrådarna var utan anmärkningar.

De mycket kraftiga men "mjuka" *slagmärken* vid skovlarnas inloppssida på MT1, på inloppskanten och på ryggen hade inte förändrats sedan föregående revision 1992. Skadorna fanns på i stort sett alla skovlarna och observerades redan vid revisionen 1984.

En del *tätkantsslitage* kunde konstateras. Tätkanterna i skoveltaket byttes mot nya p g a stort slitage och/eller rostangrepp på MT1-9 och HT1-10.

Samtliga skovlar i steg MT7 byttes som planerat. Se även **kapitel 3.2.9.4.1**.

#### 3.2.9.2.3 Mellanväggar

Mellanvägg HT4-HT10 och MT7 byttes som planerat ut mot nya. Se även kapitel 9.4.2. En viss ovalitet kunde även konstateras i mellanvägg HT1-HT3, som byttes vid revisionen 1992.

På steg MT5-MT11 fanns lätta *beläggningar* som avlägsnades. Från steg MT8 uppträdde också erosionskorrosion. Se figur 20. Denna hade ökat i omfattning sedan föregående revision. Lokal svetsreparation av *erosionsskador* utfördes på MT8-12 i delningsplan och T-spår.



**Figur 20** Erosions-korrosion i mellanvägg MT9

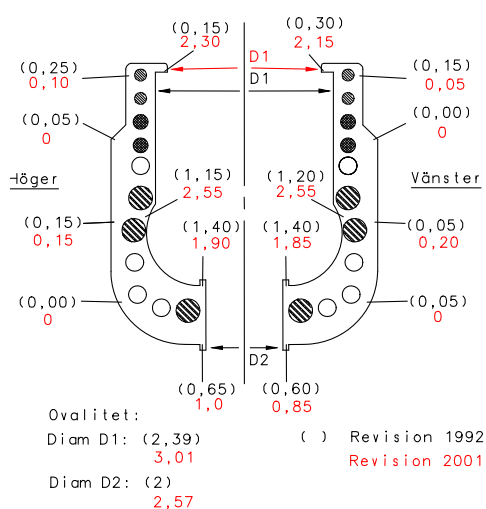
**Figure 20** Erosion-corrosion in diaphragm IP9.

#### 3.2.9.2.4 MT-hus och mellanväggsbärare 3

Beroende på *erosionskorrosionen* monterades rostfria ringhalvor för MT8-9 i mellanväggsbärare 3 och för MT10-12 i MT-hus och för mellanväggsbärare 3 i MT-hus. Lokal svetsreparation av erosionsskador utfördes också på mellanväggsbärare 3.

#### 3.2.9.2.5 HT-innerhus

*Ovaliteten* mättes upp och jämfördes med uppmätningarna 1992. Se figur 21.

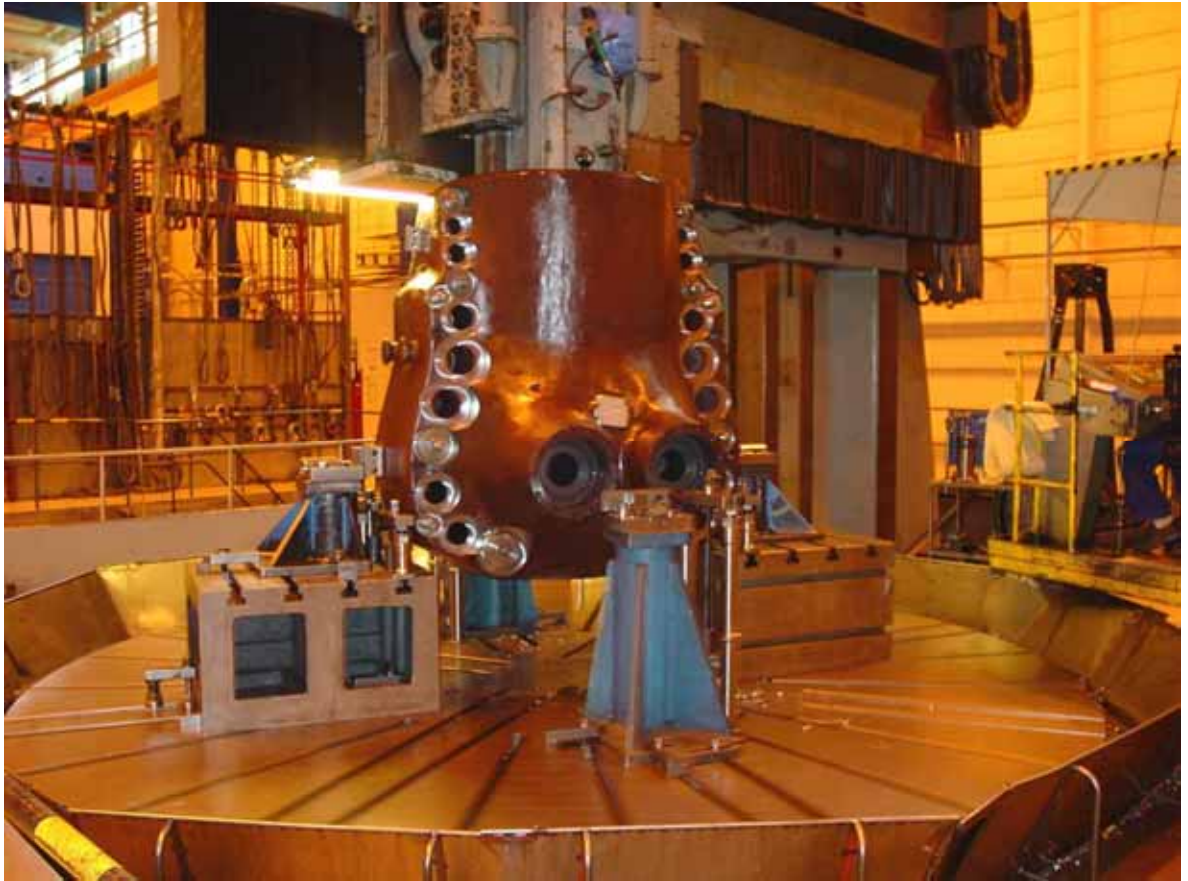


**Figur 21** Uppmätt spel (1992) och 2001

**Figure 21** Clearance measured in (1992) and in 2001.



Delningsplanen frästes plana och det mittre tätningsspartiet justersvarvades. Planfräsning utfördes även under muttrarna så att de blev parallella med de nyfrästa delningsplanen. Se även figur 22.



**Figur 22** Omfattande bearbetning utfördes på HT-innerhuset. På bilden är turbinhuset uppsatt i karusellsvarv

**Figure 22** A lot of activities were carried out on HP turbine casing. On this picture the turbine casing is set up in a vertical lathe.

Spelet ökades mellan innerhusets uppläggningsplattor och ytterhus i både horisontell- och vertikalriktning genom att använda passbitar som ger större spel. Radiellt räckte spelet till. Likaså ökades spelet vertikalt i delningsplanet mellan mellanväggarnas centreringsplattor och HT-innerhuset genom att fickorna i innerhuset gjordes djupare. Se figur 23. Detta utfördes för att reducera risk för att innerhuset skulle nypa i dess uppläggningspunkter med en ovalitet som följd.

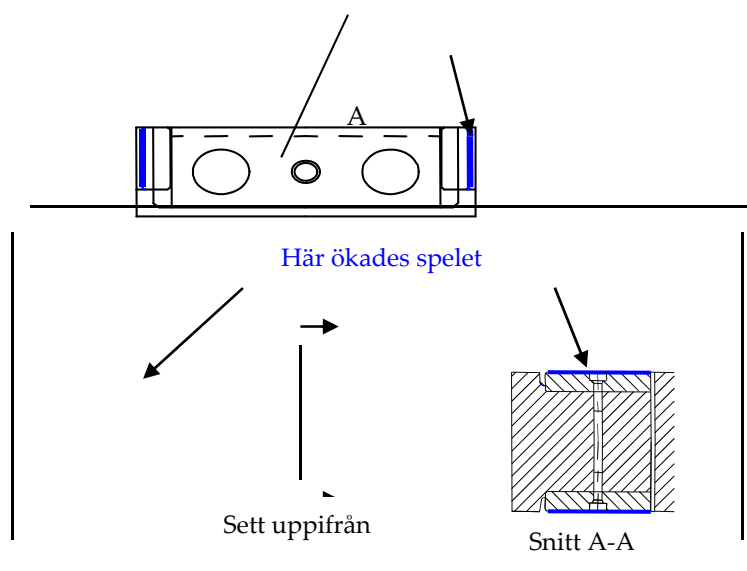
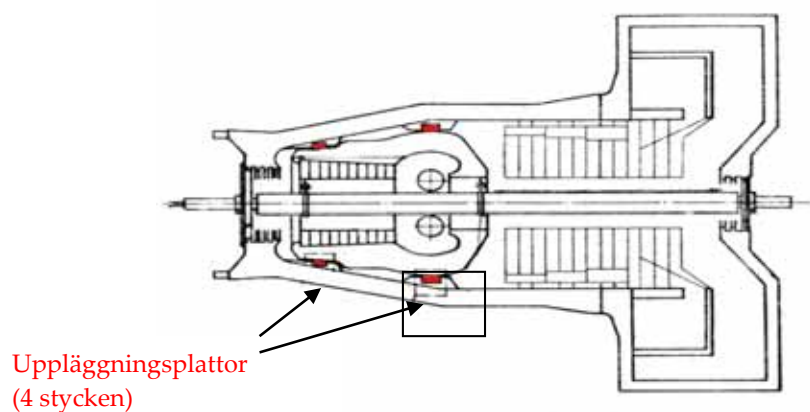
Alla pinnskruvarna och muttrar byttes ut. Pinnskruvarna som förut var varmdragna byttes nu till hydrauldragna. Material i pinnskruvarna och muttrarna byttes från låglegerat till 12% Cr stål.

Nya tätningsssegment, anpassade till nysvarvade diametrar, monterades i det mittre axeltätningsspartiet.

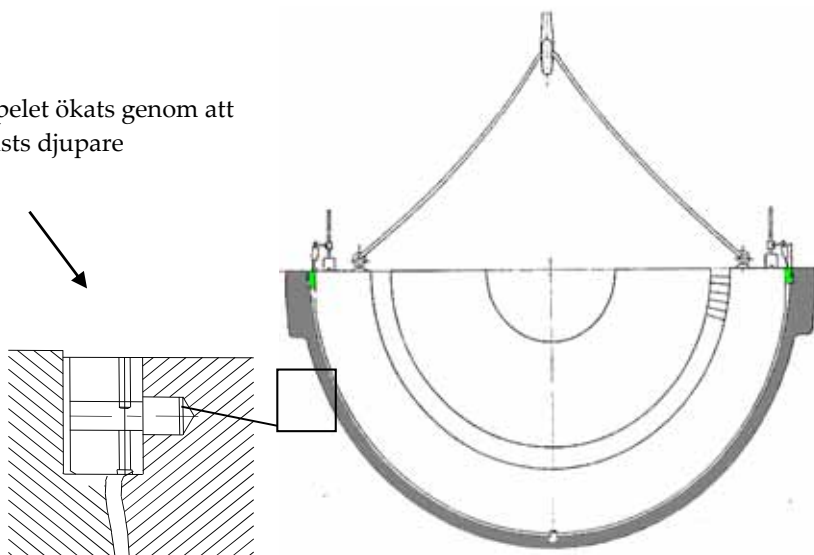
De stellitebelagda fodren i de fyra ånginloppsstutsarna hade många och djupa axiella sprickor i det påsvetsade stelliteskiktet. Alla fyra byttes.



Hårdhetsmätning på utvalda ytor i huset visade att hårdheten var cirka 15% lägre än mindata. Några krypskador framkom dock inte vid strukturanalysen.



Här har spelet ökats genom att Fickan frästs djupare

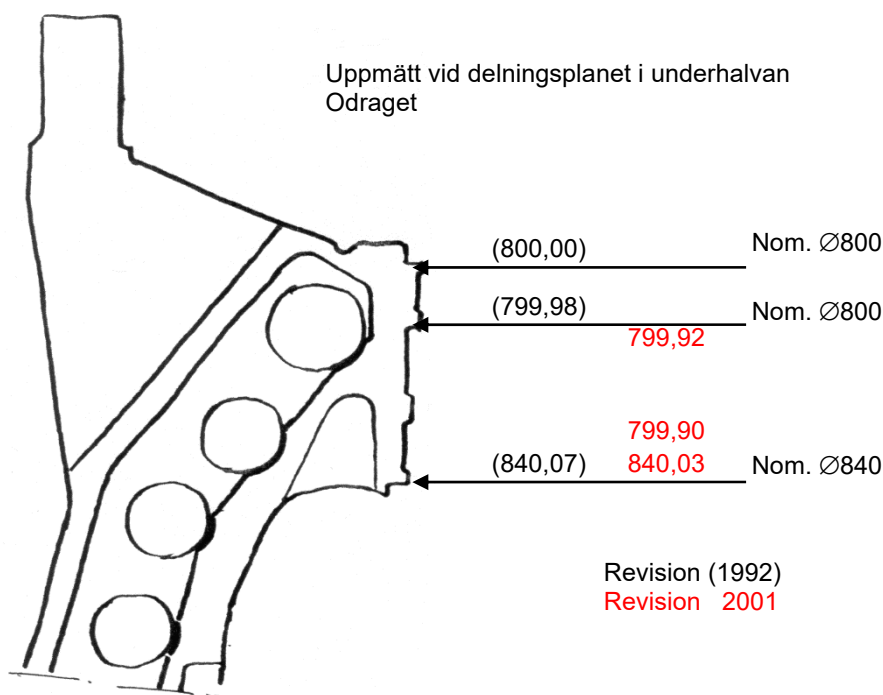


**Figur 23** Aktiviteter utförda förr att öka spelet  
**Figure 23** Modification in order to increase the clearance

### 3.2.9.2.6 HT-ytterhus

I de frästa fickorna för uppläggning av innerhuset fanns skärmärken. Styrspåret för mellanväggsbärare 1 och 2 var utan anmärkning.

Uppmätning av styrdiameter för främre axeltätningshållaren utfördes och jämfördes med mätningar från 1992. Alla avvikelser var inom måttoleransen. Se figur 24.



**Figur 24** Uppmätta diametermått (1992) och 2001  
**Figure 24** Diameters measured in (1992) and in och 2001

### 3.2.9.2.7 Inre ångrör

Tjockleken uppmättes i rörböjar. Denna visade tjockleken var 5 respektive 6 mm mindre på yttre radien än på innersidans av rörböjen. Tjockleken hade inte tidigare uppmätts varför något jämförande värde inte fanns att tillgå. Rörböjen analyserades därför istället enligt gängse teori för böckning. Den teoretiska godsfortjockning/fortunning som borde uppstå vid denna böckning avvek marginellt från de uppmätta värdena. Inget tecken på erosionsskador förelåg alltså.

Hårdhetsmätning visade att hårdheten minskat med 15 %. Hårdhetssänkningen beror på åldring av materialet. Vid åldringen sker en anlöpning av den normaliserade strukturen, vilket resulterar i en omvandling och förgrovning av karbiderna. Några krypskador observerades dock inte vid strukturundersökningen.

#### 3.2.9.2.8 Reglerventil

Sprickundersökning utfördes utan anmärkning. Samtliga fyra ventilspindlar hade ett slitage som var större än toleransområdet på ritning. Redan vid 1992-års revision var slitaget stort på två av spindlarna. På grund av leveransproblem från underleverantör kunde dock inte något byte ske under revisionen 2001. Byte är planerat till sommarstoppet 2002.

Hårdhetsmätning visade att hårdheten är cirka 20 % lägre än mindata för materialet. Hårdhetssänkningen beror av åldring av materialet. Vid åldringen sker en anlöpning av den normaliserade strukturen, vilket resulterar i en omvandling och förgrovning av karbiderna. Några krypskador observerades inte vid strukturundersökningen.

#### 3.2.9.2.9 Snabbstängningsventil

Sprickundersökning utfördes med ringa anmärkningar. Ångsilen rengjordes och bedömdes klara ytterligare lång tids drift.

Hårdhetsmätningen visade att hårdheten är cirka 20 % lägre än mindata. Hårdhetssänkningen beror av åldring av materialet. Vid åldringen sker en anlöpning av den normaliserade strukturen, vilket resulterar i en omvandling och förgrovning av karbiderna. Några krypskador observerades inte vid strukturundersökningen.

#### 3.2.9.2.10 Pinnskruvar – rotorkoppling

Längdmätning utfördes på samtliga kopplingsskruvar och jämfördes med mätningarna 1992. Förändringarna är inom mättoleransen. Sprickundersökning utfördes till 100 % utan anmärkning.

#### 3.2.9.2.11 Pinnskruvar – innerhus

Alla pinnskruvarna och muttrar byttes ut. Pinnskruvarna hade förut varit varmdragna men byttes nu till hydrauldragna. Material i pinnskruvarna och muttrarna byttes från låglegerat till 12% Cr-stål. Se även kapitel 9.4.3.

#### 3.2.9.2.12 Pinnskruvar – ytterhus

Längdmätning utfördes på samtliga 48 delningsplansskruvar. En förlängning på 1% tilläts. Ingen av pinnskruvarna hade dock förlängts mer än 0.1%. Sprickundersökning utfördes till 100% utan anmärkning.

#### 3.2.9.2.13 Pinnskruvar – reglerventil

Samtliga mindre pinnskruvar och hälften av de större kasserades på grund av demonteringsskador. Inga av de återanvända visade tecken på någon nämnvärd förlängning. De gamla pinnskruvarna placerades av praktiska skäl i de nedre två reglerventilerna, medan samtliga pinnskruvar byttes ut mot nya i de övre två reglerventilerna. Eftersom ingen längdmätning tidigare utförts fanns inget jämförande underlag. Längdmätning och instämpling utfördes vid årets revision på samtliga pinnskruvar för framtida jämförelser. Sprickundersökning utfördes till 100% på de icke utbytta utan anmärkning.

## 3.2.9.2.14 Pinnskruvar –snabbstängningsventiler

Samtliga pinnskruvar kasserades beroende på demonteringsskador. Längdmätning och instämpling utfördes vid årets revision på samtliga pinnskruvar för framtida jämförelser.

## 3.2.9.2.15 Dyssegment

Dyssegmenten var utan anmärkning. Dock byttes samtliga på kundens begäran för att möjliggöra kontinuerlig drift så länge som möjligt. Se även **kapitel 3.2.9.4.5**.

Inga krypskador observerades vid strukturundersökningen.

## 3.2.9.2.16 Dyskammare

Kanalöppningen mättes med jämn delning på samtliga fyra dyskamrar. Resultatet visade entydigt att kamrarna inte deformerats. Samtliga mått var inom tillverkningstoleransen.

Hårdhetsmätning visade att hårdheten är 40% lägre än mindata. Hårdhetssänkningen beror på åldring av materialet. Vid åldringen sker en anlöpning som gör att martensiten sönderfaller, vilket innebär att man får en utskiljning, omvandling och förgrovning av karbider. Några krypskador observerades inte vid strukturundersökningen.

## 3.2.9.2.17 Axeltätningshållare

Den främre axeltätningshållaren byttes som planerat. Se även **kapitel 3.2.9.4.6**.

## 3.2.9.2.18 Lager

Vid revisionen konstaterades ett markant ökat axiellt spel i axiallagerdelen. Spelet hade ökat till mer än det dubbla jämfört med för två år sedan. Det beslutades att införa en ny och modernare konstruktion på arrangemanget med balansarmar. Detta ger minskat anliggningstryck mellan balansarm och lagerkropp vilket innebär att axiallagerspel pga. intryckningar i lagerkroppen kommer att minskas. På andra turbiner finns mångårig och god erfarenhet av denna lösning.

Ultraljudsprovning utfördes med endast ringa anmärkningar.

## 3.2.9.3 Bedömning av återstående livslängd 2001

Samtliga de rekommendationer som gavs vid livslängdsundersökningen 1992 utfördes före eller under revisionen 2001. Att det i många fall utförts mer än de rekommendationer som gavs 1992 kan förklaras av att revisionsintervallet var satt till 5-6 år vid analysen 1992. Intervallet blev nu istället 9 år. Kunden hade också inför revisionen 2001 klart deklarerat att man hade för avsikt att köra så länge som möjligt innan nästa revision. Se sammanställningen i figur 25 nedan.

| Komponent                             | Rekommendation 1992                                                         | Vad har hänt?                                                |
|---------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| Rotor                                 | Normal revision                                                             | Utfördes 2001                                                |
| Skovel MT7<br>MT6, MT8, MT9<br>Övriga | Byts ut vid nästa tillfälle<br>Skovelvibrationsberäkning<br>Normal revision | Byttes 2001<br>Utfördes inför revision 2001<br>Utfördes 2001 |

| Komponent                       | Rekommendation 1992                                                            | Vad har hänt?                                                                                                                                  |
|---------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Mellanvägg MT7, HT4-7<br>HT8-10 | Byt till nya mellanväggar<br>Rekommendation fastställs efter<br>nästa revision | Utfört 2001<br>Byttes 2001, då det vid offertarbetet<br>framkom att risk för excitation med<br>dubbla ledskeneantalet förelåg<br>Utfördes 2001 |
| Övriga                          | Normal revision                                                                |                                                                                                                                                |
| Mellanväggsbärare och MT-hus    | Normal revision                                                                | Reparerades med anledning av<br>erosions-korrosion 2001                                                                                        |
| HT-innerhus och pinnskruvar     | Förnyad uppmätning                                                             | Reparation och modifiering av<br>innerhuset samt byte av samtliga<br>pinnskruvar utfördes 2001.                                                |
| Ytterhus                        | Normal revision                                                                | Utfördes 2001                                                                                                                                  |
| Inre ångrör                     | Förnyad undersökning med minst<br>samma omfattning                             | Utfördes 2001                                                                                                                                  |
| Reglerventilhus                 | Förnyad undersökning med minst<br>samma omfattning.                            | Utfördes 2001                                                                                                                                  |
| Snabbstängningsventilhus        | Förnyad undersökning med minst<br>samma omfattning.                            | Utfördes 2001                                                                                                                                  |
| Dyssegment                      | Bör alltid finnas i reserv                                                     | Samtliga byttes 2001                                                                                                                           |
| Dyskammare                      | Normal revision                                                                | Utfördes 2001                                                                                                                                  |
| Främre axeltätningshållare      | Utredning och åtgärd för att<br>förhindra deformation                          | Byttes ut till ny konstruktion 2001                                                                                                            |
| Lager                           | Utredning och åtgärder för att<br>förhindra vibrations-problem                 | Nytt lager 1 monterades 1994 med<br>förbättrade dämpningsegenskaper.                                                                           |
| Övriga pinnskruvar              | Normal revision                                                                | Utfördes 2001                                                                                                                                  |

**Figur 25** Rekommendationer givna 1992 i jämförelse med vad som utförts före eller under 2001

**Figure 25** Recommendation in 1992 in comparison with performed activities in 2001.

Turbinens kritiska komponenter har indelats i tre klasser på samma premisser som vid livslängdsundersökningen 1992, vilket återspeglar hur turbinens status successivt förbättrats genom de rekommenderade aktiviteterna. Se figur 26. Eventuella förflyttningar från 1992 har markerats med pilar.

| Klass 1 | Klass 2        | Klass 3                  |
|---------|----------------|--------------------------|
|         | Inre ångrör    | Rotor                    |
|         | Dyskammare (←) | Skovlar (→)              |
|         | Lager          | Mellanväggar (→)         |
|         |                | Mellanväggsbärare (→)    |
|         |                | Innerhus (→)             |
|         |                | MT-hus (→)               |
|         |                | Ytterhus                 |
|         |                | Reglerventilhus          |
|         |                | Snabbstängningsventilhus |

|  |  |                                 |
|--|--|---------------------------------|
|  |  | Pinnskruvar (→)                 |
|  |  | Dyssegment (→)                  |
|  |  | Främre axeltätningshållaren (→) |

**Figur 26**            **Klassificering 2001**  
Figure 26            Classification in 2001.

Klass 1 har högst prioritet och omfattar de komponenter som på kort sikt bedöms kunna begränsa tillgängligheten. Komponenter i klass 2 bedöms kräva åtgärder på något längre sikt. Klass 3 hanteras enligt normala rutiner vid revision.

#### 3.2.9.3.1 Rotor

Beläggningar och korrosionsangrepp hade ökat markant i omfattning sedan föregående revision. Genom blästring och tätkantsbyten kunde dock rotorn återställas till ett mycket gott skick. Den livslängdsbegränsande skademekanismen är låg-cykel-utmattning. Men eftersom turbinen även fortsättningsvis endast kommer att starta vid ett fåtal tillfällen per år samt att strukturundersökningen och sprickundersökning utfördes utan anmärkning kvarstår rotorn i **klass 3**.

#### 3.2.9.3.2 Skovlar

Att skovlarna har en låg statisk belastning framkom redan vid analysen 1992. Denna analys kompletterades nu med en dynamisk analys för de skovlar som låg i riskzonen. Efter att de kritiska skovlarna i steg MT7 hade bytts ut samt antalet ledskenor i mellanväggen före ändrats uppfylldes dagens normer för samtliga skovlar. Skovlarna placeras därmed i **klass 3**.

#### 3.2.9.3.3 Mellanväggar

De kritiska mellanväggarna i HT-turbinens steg 4-10 byttes ut. Samtliga mellanväggar placeras nu i **klass 3**.

#### 3.2.9.3.4 Mellanväggsbärare och MT-hus

Omfattande reparationer och förebyggande insatser beträffande erosionskorrosionsskador utfördes vid revisionen. Komponenterna bör nu kunna behandlas enligt normala revisionsrutiner. Klassen blir därmed **3**.

#### 3.2.9.3.5 Innerhus

Omfattande reparationer och modifieringar för att förhindra ovalisering utfördes. Komponenten betraktas inte längre som kritisk utan kan följas upp enligt normalt revisionsprogram och placeras därmed i **klass 3**.

#### 3.2.9.3.6 Ytterhus

Inget anmärkningsvärt framkom vid årets revision. Ytterhuset placeras även fortsättningsvis i **klass 3**.

#### 3.2.9.3.7 Inre ångrör

Den återstående beräknade kryplivslängden är kort. Såväl strukturundersökning som sprickundersökning genomfördes dock utan anmärkning. Hårdhetsmätning visade

dock att hårdheten ligger 15% under minvärdet, vilket indikerar att hållfastheten dvs. förlängningsgränsen och brottgränsen också minskat. Kryp- och LCF-livslängden borde enligt tidigare erfarenhet inte ha påverkats nämnvärt. Ångrören placeras därför även fortsättningsvis i **klass 2**.

#### 3.2.9.3.8 Reglerventil

Inget anmärkningsvärt framkom vid årets revision förutom att hårdheten ligger 20 % under minvärdet, vilket indikerar att hållfastheten dvs. förlängningsgränsen och brottgränsen också minskat. Kryp- och LCF-livslängden borde däremot enligt tidigare erfarenhet inte ha påverkats nämnvärt. Reglerventilhuset placeras även fortsättningsvis i **klass 3**.

#### 3.2.9.3.9 Snabbstängningsventil

Inget anmärkningsvärt framkom vid årets revision förutom att hårdheten ligger 20 % under minvärdet, vilket indikerar att hållfastheten dvs. förlängningsgränsen och brottgränsen också minskat. Kryp- och LCF-livslängden borde däremot enligt tidigare erfarenhet inte ha påverkats nämnvärt. Snabbstängningsventilhuset placeras även fortsättningsvis i **klass 3**.

#### 3.2.9.3.10 Pinnskruvar - rotorkoppling

Pinnskruvarna sprickundersöktes till 100% och längdmättes utan anmärkning vilket placerar dem i **klass 3**.

#### 3.2.9.3.11 Pinnskruvar - innerhus

Pinnskruvarna byttes ut till en ny typ vilket förflyttar dem till **klass 3**.

#### 3.2.9.3.12 Pinnskruvar - ytterhus

Pinnskruvarna sprickundersöktes till 100% och längdmättes utan anmärkning vilket placerar dem i **klass 3**.

#### 3.2.9.3.13 Pinnskruvar - reglerventil

Hälften av pinnskruvarna är nya övriga längdmättes och sprickundersöktes utan anmärkning vilket placerar dem i **klass 3**.

#### 3.2.9.3.14 Pinnskruvar - snabbstängningsventil

Samtliga pinnskruvar är nya vilket placerar dem i **klass 3**.

#### 3.2.9.3.15 Dyssegment

Dyssegmenten var utan anmärkning. Samtliga byttes dock ut på kundens inrådan. Klassen blir **3**.

#### 3.2.9.3.16 Dyskammare

Hårdheten ligger 40 % under minvärdet, vilket indikerar att hållfastheten dvs. förlängningsgränsen och brottgränsen också minskat. Kryp- och LCF-livslängden borde däremot inte ha påverkats nämnvärt. Några krypskador observerades inte vid struktur-undersökningen. Dyskammarna bör hållas under uppsikt pga. den reducerade hållfastheten och placeras i **klass 2**.



#### 3.2.9.3.17 Axeltättningshållare

Axeltättningshållaren byttes ut vid revisionen. Den nya hållaren placeras i **klass 3**.

#### 3.2.9.3.18 Lager

Turbinen har visat sig vara vibrationskänslig. En del åtgärder har utförts. Komponenten behålls tills vidare i **klass 2**.

### 3.2.9.4 Rekommendation om reparation och utbyte efter genomförd revision 2001

Baserat på den klassificeringen som utfördes i kap 9.3 har följande rekommendationer sammanställts för framtida revisioner. Se figur 27. De flesta komponenternas status har förbättrats varför de kan hanteras enligt normala revisionsrutiner.

| Komponent                    | Rekommendation 2001                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Rotor                        | Förnyad svarvning och borstplätering av rotoraxel i MT-del bli nödvändig. Ett införande av tätkanter i detta område kan innebära en förbättring i erosionshänseende, men kanske rotordynamiska problem, varför detta måste analyseras ytterligare innan någon rekommendation kan ges. |
| Skovlar                      | Normal revision med samma omfattning som tidigare                                                                                                                                                                                                                                     |
| Mellanväggar                 | -"-                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| Mellanväggsbärare och MT-hus | -"-                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| HT-innerhus och pinnskruvar  | -"-                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| Ytterhus                     | -"-                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| Inre ångrör                  | Förnyad undersökning med minst samma omfattning                                                                                                                                                                                                                                       |
| Reglerventilhus              | Normal revision med samma omfattning som tidigare                                                                                                                                                                                                                                     |
| Snabbstängningsventilhus     | -"-                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| Dyssegment                   | -"-                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| Dyskammare                   | Materialet visar tecken på åldring. Förnyad undersökning med minst samma omfattning som tidigare.                                                                                                                                                                                     |
| Främre axeltätningshållare   | Normal revision med jämförande uppmätningar                                                                                                                                                                                                                                           |
| Lager                        | Uppföljning av vibrationsbetendet efter åtgärderna vid revisionen 2001.                                                                                                                                                                                                               |
| Övriga pinnskruvar           | Normal revision med samma omfattning som tidigare                                                                                                                                                                                                                                     |

**Figur 27**            **Rekommendationer 2001**  
**Figure 27**        **Recommendations in 2001.**

### 3.2.9.5 Uppföljning av utbytta komponenter 2001

#### 3.2.9.5.1 Skovlar MT7

Vid inspektionen upptäcktes att de indiktade tätkanterna var spruckna på ett flertal ställen. Sprickorna var av den omfattningen att risk för att skovlarna skulle bli odämlade var uppenbar. Slutsatsen blir att bytet kom i sista stund!

Skovelfoten har också sprickundersökts till 100% utan anmärkning.

### 3.2.9.5.2 MT7, HT4-10

Dagens beräkningsnormer uppfylldes inte för mellanvägg HT4-10 pga. de höga påkänningarna. Högst påkänningar beräknades uppkomma i ledskenorna. Med anledning av kundens önskan om ett så långt revisionsintervall rekommenderades utbyte baserat på denna beräkning samt det faktum att mellanvägg HT1-3 bytts ut på grund av skador redan 1992.

Huruvida ledskenorna skadats var svårt att uttala sig om utan att demontera dessa. Hårdhetsmätning med Equotip, vilket är en oförstörande metod, har tidigare visat sig vara en otillförlitlig metod för ledskenor monterade i mellanväggar. Ovaliteten, d v s diametern vertikalt relativt horisontellt, hade fördubblats på HT4 sedan 1984. Kupigheten, d v s de axiella snedställningen, var störst på mellanvägg 10 där den uppgick till 0.6 mm, vilket betraktas som ett ganska högt värde.

På MT7 fanns av naturliga skäl inga anmärkningar då bytet genomfördes med anledning av att ledskenantalet genererade impulser med en för skovelsteget ogynnsam frekvens.

### 3.2.9.5.3 Pinnskruvar HT-innerhus

Samtliga pinnskruvar längdmättes. Längdmätningen jämfördes med tidigare revisionsresultat 1984 och 1992. Vid jämförelsen framgick att samtliga pinnskruvar förlängts cirka en tiondels procent sedan turbinstarten - utom pinnskruv 15 och 16. Dessa två byttes till pinnskruvar i ett bättre material redan vid revisionen 1992 bland annat beroende av att förlängning då var 0.3 %, vilket innebar att i stort sett hela förspänningstojningen övergått i plastisk deformation. Vid årets revision uppvisade dessa två pinnskruvar en lägre töjningshastighet än förut men fortfarande töjdes dessa klart snabbare än övriga pinnskruvar. Samtliga pinnskruvar byttes enligt planeringen ut mot hydrauldagna med nytt material.

Bytet var en delaktivitet för att minska HT-innerhusets benägenhet att bli ovalt. Dessutom ökades spelet vid husets uppläggningstassar vilket beskrivs i tidigare kapitel.

Sprickundersökning har utförts till 100% utan anmärkning.

### 3.2.9.5.4 Pinnskruvar reglerventil och snabbstängningsventiler

Större delen av pinnskruvarna i reglerventilerna och snabbstängningsventilerna byttes ut på grund av demonteringsskador. Längdmätningen var inte möjlig att genomföra på de skadade skruvarna. Sprickundersökning utfördes dock utan anmärkningar.

### 3.2.9.5.5 Dyssegment

Vid den visuella inspektionen befanns dyssegmenten vara i gott skick. Sprickundersökningen och strukturundersökningen utfördes också utan anmärkning. Bytet utfördes på kundens begäran p g a planerad tid till nästa revision.

### 3.2.9.5.6 Främre axeltätningshållaren

På den främre axeltätningshållaren mättes innerdiametern upp och jämfördes med motsvarande värden 1992. I framkant hade ovaliteten ökat från 0.4mm till 0.7mm, medan den i bakkant hade ökat från 1.65 mm till 2.11 mm.

Även spelen i delningsplanet mättes upp. Vid *draget* förband fanns ett spel i delningsplanet på insidan. Spelet uppgick till 0.4 mm i bakkant och 0.1 mm i framkant.

Bytet var nödvändigt för att undvika de problem som uppstått med läckage och tätkantkontakt mot rotorn.

### 3.2.10 SLUTSATSER

Målet med studien var bland annat att genomföra en s k livslängdsanalys av en ångturbin genom att applicera den metodik och struktur för livslängdsarbete som tagits fram i Livslängdshandboken.

I studien betraktas främst analysfasen och den metod som valdes var EPRI:s tre-nivå-metod. Denna metod bygger på en struktur där man identifierar och klassificerar potentiellt kritiska komponenter och därefter rekommenderar åtgärder som ligger i linje med den strategi som formulerats av anläggningsägaren

Många intressanta iakttagelser och slutsatser kan formuleras efter denna relativt omfattande studie. Det angreppssätt och den struktur som beskrivs i Livslängdshandbokens del 1 är en utmärkt ledstäng för anläggningsägaren och för den relation mellan anläggningsägare och leverantör som erfordras för att genomföra ett livslängdsarbete.

En av de tyngre delarna i en livslängdsstudie är att samla den information som erfordras avseende turbinens drifhistorik och komponenthistorik. I detta fall fanns komponent-historiken och till viss del även driftshistorik väl dokumenterad vid ALSTOM Power Sweden AB. Att samma företag, som ursprungligen konstruerade och levererade anläggningen, även har genomfört inspektioner, revisioner, utredningar m m innebär att samlad information om anläggningen fanns att tillgå. Sydkraft MälarVärme hade relativt god struktur på drifhistorik - såsom start, stopp och drifttider. Dock saknades en samlad bild av onormala händelser, avvikelser som generellt sett kan vara väsentligt vid en analys av återstående livslängd.

Studien visar att med livslängdsanalysen som bas och med implementering av livslängdsförlängande åtgärder har man en bra förutsättning för att få en turbin med många driftstimmar bakom sig att motsvara kundens krav på hög tillgänglighet under en förhållandevis lång period. För Sydkraft MälarVärme utgjorde livslängdsstudien 1992 tillsammans med långsiktiga ekonomiska aspekter utgångspunkt för planeringen av revisionen 2001. Med den detaljerade komponentkunskap som förelåg, kunde revisionsomfattningen fastställas på ett tidigt stadium. Reservdelar och verkstads-resurser kunde tidigt beställas liksom de kompletterande teoretiska analyser som bedömdes nödvändiga. Sydkraft MälarVärme AB har efter den förnyade studie en turbin med färre kritiska komponenter än 1992 samt ett utmärkt material för att kunna planera sina framtida revisioner.

Denna pilotstudie har genomförts på en ångturbin, men vi är övertygade om att samma struktur och betraktelsesätt kan användas på en hel anläggning.

### 3.2.11 GENERELLA ERFARENHETER

Arbetet har identifierat ett antal nyckelfrågeställningar som man bör beakta i ett livslängdsarbete. Listan skall inte betraktas som komplett utan enbart som ett antal frågeställningar som redan finns beskrivna i del 1 i livslängdshandboken men som kan kräva lite extra fokus vid ett livslängdsarbete.

Då man som anläggningsägare skall inleda en livslängdsanalys bör man naturligtvis använda den struktur som tagits fram i handboken avseende målbeskrivning e t c. Dock bör man i den initiala planeringen speciellt beakta sin egen dokumentationsstruktur t ex:

- hur lätt information kan tas fram angående drift och underhåll
- hur väl inspektioner, revisioner, ombyggnader mm har dokumenterats

Då flera metoder för livslängdsanalys kräver att historiken beaktas för att möjliggöra en bedömning av återstående livslängd är denna del väsentlig. Genom att tidigt analysera ovanstående punkter får man inte enbart en uppfattning om tidsåtgången för en livslängdsanalys utan också en uppfattning om dess tillförlitlighet. Som leverantör ser ALSTOM Power Sweden AB att den struktur på informationen som erfordras ofta är bristfällig. I det studerade fallet fanns dock den mest väsentliga informationen.

En annan generell erfarenhet är att dokumentationsstruktur dvs. vad och hur en anläggningsägare bör dokumentera för att möjliggöra framtida livslängdsanalyser per anläggningsdel, är ett område som kan kräva ytterligare fördjupning. Här finns ett stort behov av fortsatt arbete, av t ex Värmeforsk. Det som saknas är en struktur för anläggningsägare:

- hur drifthistoriken kan följas upp på ett strukturerat sätt
- hur dokumentationen ska utföras
- vilken dokumentation som ska krävas in från företag som utfört arbeten på anläggningen

Utgående ifrån slutsatserna och erfarenhet enligt ovan är vi dock övertygade om att Livslängdshandboken är ett värdefullt verktyg för anläggningsägaren och den kan appliceras för livslängdsarbete på anläggningsnivå. Dock erfordras att leverantör och kund lär sig att ha en relation som möjliggör denna typ av analyser. En vidare hjälp kan vara att Värmeforsk fortsätter sitt arbete med att fördjupa handboken avseende bl a informationsstruktur, se ovan.

## A Driftshistorik

| Driftår      | Antal drifttimmar | Antal Kallstarter | Antal varmstarter | Ackumulerad drifttid i tim |
|--------------|-------------------|-------------------|-------------------|----------------------------|
| 1974         | 542               | X                 | X                 | 542                        |
| 1975         | 5 591             | 6                 | 25                | 6 133                      |
| 1976         | 5 723             | 2                 | 9                 | 11 856                     |
| 1977         | 5 997             | 3                 | 13                | 17 853                     |
| 1978         | 6 053             | 2                 | 8                 | 23 906                     |
| 1979         | 5 217             | 5                 | 9                 | 29 123                     |
| 1980         | 4 925             | 4                 | 10                | 34 048                     |
| 1981         | 4 340             | 5                 | 6                 | 38 388                     |
| 1982         | 4 193             | 2                 | 12                | 42 581                     |
| 1983         | 1 866             | 4                 | 4                 | 44 447                     |
| 1984         | 1 622             | 5                 | 9                 | 46 069                     |
| 1985         | 3 145             | 3                 | 13                | 49 214                     |
| 1986         | 3 742             | 3                 | 10                | 52 956                     |
| 1987         | 2 994             | 2                 | 4                 | 55 950                     |
| 1988         | 1 787             | 3                 | 3                 | 57 737                     |
| 1989         | 703               | 4                 | 10                | 58 440                     |
| 1990         | 1 587             | 9                 | 11                | 60 027                     |
| 1991         | 3 433             | 5                 | 18                | 63 460                     |
| 1992         | 3 833             | 5                 | 18                | 67 293                     |
| 1993         | 3 880             | 2                 | 2                 | 71 173                     |
| 1994         | 5 066             | 1                 | 7                 | 76 239                     |
| 1995         | 5 714             | 1                 | 15                | 81 953                     |
| 1996         | 5 704             | 1                 | 7                 | 87 657                     |
| 1997         | 4 660             | 3                 | 14                | 92 317                     |
| 1998         | 5 817             | 3                 | 9                 | 98 134                     |
| 1999         | 5 068             | 1                 | 3                 | 103 202                    |
| 2000         | 5 622             | 3                 | 7                 | 108 824                    |
| <b>SUMMA</b> | <b>108824</b>     | <b>87</b>         | <b>256</b>        |                            |

## B KOMPONENTHISTORIK

| Komponent           | Revision 1984                                                                                                                                                           | 1984-1992                                                                                                | Genomgång av design-beräkningar 1992                                  | Kompletterande beräkningar 1992                                                      | Revision 1992                                                                                                                                                                                                                                             | 1992-2001                   | Kompletterande beräkningar 2001                                          | Revision 2001                                                                                                                                                                                                                                                     |
|---------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|--------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Rotor</b>        | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Slagmärken på reglerstegsskivlar</li> <li>• Diktråd fattades. Tåkanterna på rotoraxeln byttes ut</li> <li>• Erosion</li> </ul> | Årlig fiberoptik-inspektion från 1987                                                                    | Balanserings-skivan (kap 8.1.1.1)<br>Reglerstegs-skivan (kap 8.1.1.2) | <p>(kap 8.2)</p> <p>Bojsvängnings-beräkningar (kap 8.2.1)</p>                        | <p>(kap 8.3)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Slagmärken på reglersskivlar</li> <li>• Tåkantsslitage</li> <li>• Skallning</li> <li>• Stilleståndskorrosion</li> <li>• Erosions-korrosion</li> <li>• Iskärningar</li> </ul> <p>(kap 8.3.1)</p> | Årlig fiberoptik-inspektion | <p>(kap 9.1)</p>                                                         | <p>(kap 9.2)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Slagmärken på reglersskivlar</li> <li>• Tåkantsslitage. Samtliga tåkanter byttes.</li> <li>• Skallning</li> <li>• Stilleståndskorrosion</li> <li>• Erosions-korrosion</li> <li>• Iskärningar</li> </ul> |
| <b>Skovlar</b>      | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Tåkantsslitage</li> </ul>                                                                                                      | <p>Årlig fiberoptik-inspektion från 1987</p> <p>1991 upptäcktes att dämptråden på MT12 var brusten</p>   |                                                                       | <p>Hållfasthets-beräkning samt dynamisk beräkning på steg MT7</p> <p>(kap 8.2.2)</p> | <p>På MT12 var dämptråden brusten på två ställen. Samtliga dämptrådar byttes. Spricka i skovel i MT7. Skoveln byttes. Beläggningar</p> <p>Vattendroppserosion</p> <p>Tåkantsslitage</p> <p>Slagmärken MT1</p> <p>(kap 8.3.2)</p>                          | Årlig fiberoptik-inspektion | <p>Dynamiska beräkningar på steg MT6, MT8 och MT9</p> <p>(kap 9.1.1)</p> | <p>(kap 9.2.1)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Skovelarna i MT7 byttes ut</li> <li>• Beläggningar</li> <li>• Vattendroppserosion</li> <li>• Tåkantsslitage</li> <li>• Slagmärken MT1</li> </ul> <p>(kap 9.2.2)</p>                                   |
| <b>Mellanväggar</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Kraftiga slagmärken på MT1</li> <li>• HT1-HT3 deformationer</li> <li>• Erosion</li> </ul>                                      | <p>Årlig fiberoptik-inspektion från 1987</p> <p>1990 upptäcktes att två led-skenor i HT1 var brustna</p> |                                                                       | <p>Hållfasthets-beräkning</p> <p>(kap 8.2.3)</p>                                     | <p>HT1-HT3 och MT1 byttes ut</p> <p>Beläggningar</p> <p>Erosions-korrosion</p> <p>Sprickindikationer i källsvetsar</p> <p>(kap 8.3.3)</p>                                                                                                                 | Årlig fiberoptik-inspektion | <p>Hållfasthets-beräkning</p> <p>(kap 9.1.2)</p>                         | <ul style="list-style-type: none"> <li>• HT4-HT10 byttes</li> <li>• Beläggningar</li> <li>• Omfattande reparation av erosionskorrosions-skador</li> </ul> <p>(kap 9.2.3)</p>                                                                                      |



| Komponent                           | Revision 1984                                                                                                                       | 1984-1992                                       | Genomgång av design-beräkningar 1992 (kap 8.1) | Kompletterande beräkningar 1992 (kap 8.2)             | Revision 1992 (kap 8.3)                                                                                                                                               | 1992-2001                                                                  | Kompletterande beräkningar 2001 (kap 9.1)     | Revision 2001 (kap 9.2)                                                                                                                                         |
|-------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Mellanväggsbärare och MT-hus</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>Korrosion</li> <li>Erosionskorrosion</li> </ul>                                              |                                                 |                                                |                                                       | <ul style="list-style-type: none"> <li>Korrosion</li> <li>Erosionskorrosion</li> </ul> (kap 8.3.4)                                                                    | Årlig inspektion av MT-hus<br>1998<br>Kontrollerades MT-husets glidförmåga |                                               | <ul style="list-style-type: none"> <li>Omfattande reparation av erosionskorrosionsskador</li> <li>Korrosion</li> </ul> (kap 9.2.4)                              |
| <b>HT-innerhus</b>                  | <ul style="list-style-type: none"> <li>Huset utan anmärkning</li> <li>Vissa pinnskruvar hade en stor kvarstående töjning</li> </ul> |                                                 | Innerhuset och dess pinnskruvar (kap 8.1.2)    | Kryprelaxationsberäkning på pinnskruvarna (kap 8.2.4) | <ul style="list-style-type: none"> <li>Deformation</li> <li>Skallning</li> <li>Pinnskruvarna hade en stor kvarstående töjning. Nr14-16 byttes.</li> </ul> (kap 8.3.5) | 1995<br>Omräkning                                                          | Dimensionering av nya pinnskruvar (kap 9.1.3) | <ul style="list-style-type: none"> <li>Omfattande reparation av innerhuset</li> <li>Byte av pinnskruvar</li> <li>Ökning av samtliga spel</li> </ul> (kap 9.2.5) |
| <b>HT-ytterhus</b>                  | <ul style="list-style-type: none"> <li>Utan anmärkning</li> </ul>                                                                   | Årligen fundamentavvägningar och spel-mätningar |                                                |                                                       | <ul style="list-style-type: none"> <li>Utan anmärkning</li> </ul> (kap 8.3.6)                                                                                         | Årligen fundamentavvägningar och spel-mätningar                            |                                               | <ul style="list-style-type: none"> <li>Utan anmärkning</li> </ul> (kap 9.2.6)                                                                                   |
| <b>Inre ångrör</b>                  | <ul style="list-style-type: none"> <li>Utan anmärkning</li> </ul>                                                                   |                                                 |                                                | Stationär spänningsberäkning med FEM (kap 8.2.5)      | <ul style="list-style-type: none"> <li>Utan anmärkning</li> </ul> (kap 8.3.7)                                                                                         |                                                                            |                                               | <ul style="list-style-type: none"> <li>Hårdhetsminskning</li> </ul> (kap 9.2.7)                                                                                 |
| <b>Reglerventil</b>                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>Utan anmärkning</li> </ul>                                                                   |                                                 |                                                | Stationär spänningsberäkning med FEM (kap 8.2.5)      | <ul style="list-style-type: none"> <li>Sprickindikationer</li> <li>Slitage</li> </ul> (kap 8.3.8)                                                                     |                                                                            |                                               | <ul style="list-style-type: none"> <li>Slitage</li> <li>Hårdhetsminskning</li> </ul> (kap 9.2.8)                                                                |

| Komponent                    | Revision 1984                                                                     | 1984-1992                                   | Genomgång av design-beräkningar 1992 (kap 8.1) | Kompletterande beräkningar 1992 (kap 8.2)        | Revision 1992 (kap 8.3)                                                                                                    | 1992-2001                                   | Kompletterande beräkningar 2001 (kap 9.1)                    | Revision 2001 (kap 9.2)                                                                                                        |
|------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|------------------------------------------------|--------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Snabbstängningsventil</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Utan anmärkning</li> </ul>               |                                             |                                                | Stationär spänningsberäkning med FEM (kap 8.2.5) | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Sprickindikationer (kap 8.3.9)</li> </ul>                                         |                                             |                                                              | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Hårdhetsminskning (kap 9.2.9)</li> </ul>                                              |
| <b>Dyssegment</b>            | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Alla fyra segmenten byttes ut</li> </ul> |                                             |                                                |                                                  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Kraftigt slitage på två segment. Dessa byttes. Slagmärken (kap 8.3.15)</li> </ul> |                                             |                                                              | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Utan anmärkning</li> <li>• Samliga byts ut på kundens begäran (kap 9.2.15)</li> </ul> |
| <b>Dyskammare</b>            | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Utan anmärkning</li> </ul>               |                                             |                                                |                                                  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Skalning (kap 8.3.16)</li> </ul>                                                  |                                             |                                                              | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Hårdhetsminskning (kap 9.2.16)</li> </ul>                                             |
| <b>Axeltätningshållare</b>   | Tätkanterna på de stationära tätningssegmenten har nermagnalade. Vissa byttes ut. |                                             |                                                |                                                  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Främre hållaren deformationerad (kap 8.3.17)</li> </ul>                           | 1995 Omriktning                             | Dimensionering av ny främre axeltätningshållare. (kap 9.1.4) | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Hållaren byttes ut (kap 9.2.17)</li> </ul>                                            |
| <b>Lager</b>                 |                                                                                   | Årliga inspektioner 1985 byggdes lager 3 om |                                                |                                                  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Bindfel (kap 8.3.18)</li> </ul>                                                   | Årliga inspektioner 1994 byggdes lager 1 om |                                                              | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ökat axiellt spel (kap 9.2.18)</li> </ul>                                             |

## BILAGA 1 NOMENKLATUR

### ***anläggning / plant / Anlage***

En grupp av sammankopplade (tryckbärande) anordningar (AFS1994:9). I handboken avses med anläggning samma betydelse som produktionsanläggningsenhet (inklusive alla typer av anordningar). En anläggning har indelning i olika anläggningsdelar.

### ***analys / analysis / analyse***

Bestämning av beståndsdelar. Undersökning av förhållandet mellan olika beståndsdelar i en företeelse.

### ***aggregat / aggregate / Aggregat***

Flera (tryckbärande) anordningar som satts samman av en tillverkare för att bilda en integrerad och funktionell enhet (AFS 1999:4).

### ***besiktning / inspection / Besichtigung***

Kontroll som skall utföras av ackrediterat organ i form av installationsbesiktning, återkommande besiktning eller revisionsbesiktning (AFS 1994:9).

### ***degradering / degradation / Abtragung***

En av tid, användning eller externa orsaker oåterkallelig gradvis försämring av en eller flera av en enhets egenskaper.

NOT 1: degradering kan leda till fel.

NOT 2: degradering betraktas ofta som förslitning.

(UTEK 1999)

### ***drift / operation / Betrieb***

Verksamhet med avsikt att åstadkomma en angiven *prestation* från enhet genom aktiviteter som ej påverkar enhetens funktionsförmåga.

Drift kan inkludera ändring av enhetens funktionstillstånd (SS 441 05 05).

### ***driftsäkerhet / availability performance / Verfügbarkeit***

Egenskap hos enhet att kunna utföra angiven prestation under angivna betingelser med hänsyn tagen till prestationsnedsättning på grund av fel och underhåll (SS 441 05 05).

### ***egenkontroll / internal control / Eigenkontrolle***

Kontroll som utförs i egen verksamhet (även av utomstående) på eget ansvar (AFS1994:9).

### ***ekonomisk livslängd / economical life time / Wirtschaftliche Lebensdauer***

Ekonomisk livslängd är den tidsperiod under vilken drift av en komponent, ett system eller en hel anläggning är ekonomiskt gynnsammare än det till buds stående mest fördelaktiga alternativet.

**enhet / item / Betrachtungseinheit**

En enhet används som benämning för varje system, aggregat, komponent, detalj eller annat som med avseende på de egenskaper de har kan betraktas separat från sin omgivning.

En enhet kan bestå av lika eller olika underenheter eller utgöra en del av en större enhet.

**fel / failure / Fehler**

När förmågan upphör för en enhet att utföra *krävd funktion*. (UTEK 1999)

Avvikelse från givna fordringar i fråga om viss egenskap. (SS 441 05 05)

**felavhjälpning / fault correction / Fehlerbehebung**

Åtgärd för upphävande av fel som är känt till läge och art. Felavhjälpning kan ske genom utbyte av eller åtgärd på felaktig enhet. (SS 441 05 05)

**fluider / fluid / fluide**

Gaser, vätskor och ångor i ren fas samt blandningar av dessa. En fluid kan innehålla fasta ämnen (en suspension). (AFS 1999:4)

**haverimekanism / failure mechanism / Fehlermechanismus**

En haverimekanism är en mekanism som leder till haveri eller kollaps av en komponent eller system. Exempel på haverimekanismer är brott, buckling, plastisk kollaps.

**inspektion / inspection / Inspektion**

Kontroll av *överensstämmelse* genom mätning, observation, test eller bedömning av en enhets karakteristika.

NOT: inspektion kan utföras före, i samband med, eller efter andra underhållsaktiviteter.

(UTEK 1999)

**konditionsanalys / condition analysis / Zustandsanalyse**

se tillståndsanalys.

**konditionsövervakning / condition monitoring / Zustandsüberwachung**

se tillståndsovervakning.

**komponent / component / Bauteil**

Del av system eller aggregat.

**krävd funktion / required function / Erfordern Funktion**

En funktion eller kombination av funktioner hos en enhet som anses nödvändig för att utföra *krävd prestation*. (UTEK 1999)

***livslängdsanalys / life time analysis / Lebensdaueranalyse***

En livslängdsanalys är det analysarbete som utförs i samband med bedömning av en komponents, ett systems eller en hel anläggnings återstående tekniska livslängd.

***livslängdsstyrning / life time management / LebensdauerAuslegung***

Livslängdsstyrning innefattar ledning och styrning av livslängdsarbetet med en anläggning utgående från:

- givna krav, önskemål och policyn;
- tidigare erfarenheter;
- säkerhetskrav;
- ekonomiska krav;
- miljökrav.

***prestation / performance / Leistung***

Mätbart resultat av en enhets utnyttjade prestationsförmåga. (SS 441 05 05)

***prediktering / prediction / Vorhersage***

Aktivitet med syfte att förutsäga värde på mått.

Aktiviteten består av delaktiviteter såsom spänningsanalys, feleffektsanalys och underhållsanalys.

***redundans / redundancy / Redundanz***

Förekomst av mer än en möjlighet att vid ett angivet tillfälle kunna utföra krävd funktion hos en enhet. (UTEK1999)

***reparation / repair / Reparatur***

Reparation kan ha en varierande innebörd. I handboken avses med reparation en åtgärd för upphävande av fel på en enhet som är känt till läge men inte nödvändigtvis till art, utan byte av enheten, jfr *felavhjälpling* som i SS 441 05 05 föreslås definiera reparation i sin snävaste bemärkelse.

***rörledning / pipe line / Rohrleitung***

Rör, kopplingar, rörtillbehör, expansionskomponenter, slangar eller andra tryckbärande delar som är avsedda för transport av *fluider* och är hopfogade för att integreras i ett tryckbärande *system*.

***skademekanism / damage mechanism / Schadenmechanismus***

En skademekanism är en mekanism som degenererar materialet i en komponent. Exempel på skademekanismer är krypning, korrosion, spänningskorrosion, etc.

***system / system / System***

Flera sammansatta (tryckbärande) anordningar.

***säkerhetsutrustning / safety device / Sicherheitsvorrichtung***

Utrustning avsedd att skydda *tryckbärande anordningar* mot överskridande av tillåtna gränser, till exempel säkerhetsventiler och brytare. (AFS 1999:4)

**säkerhetsfaktor / safety factor / Sicherheitsfaktor**

En säkerhetsfaktor är en faktor för beaktande av tillverknings-, provnings-, besiktnings- och driftförhållanden så att den lämnar täckning för bl.a.:

- osäkerhet i uppskattning av uppträdande påkänningar;
  - materialfel som ej kan upptäckas vid aktuell provning och kontroll;
  - formavvikelse enligt för tillverkningen normala toleranser motsvarande god verkstadspraxis.
- (AFS 1999:4)

**teknisk livslängd / technical life time / Technische Lebensdauer**

Teknisk livslängd är den tidsperiod en komponent, ett system eller en hel anläggning tekniskt sett kan (säkert) drivas med avsedd funktion.

**tillförlitlighet / reliability / Zuverlässigkeit**

En sammanfattande benämning för att beskriva egenskapen driftsäkerhet och de egenskaper som påverkar denna: funktionssäkerhet, underhållsmässighet och underhållssäkerhet. (UTEK 1999)

**tillgänglighet / availability / Verfügbarkeit, Zugänglichkeit**

Tidstillgänglighet = (drifttid + beredskapstid) / nominell tid

Detta innebär den tid som anläggningen är i drift plus den tid som anläggningen är ur drift men kan utnyttjas med kort varsel, under en betraktad period (t.ex. ett år).

Detta innebär producerad energimängd plus den energimängd som skulle kunna produceras från det som står under beredskap, dividerat med den energimängd anläggningen kan avge under betraktad period.

Energitillgänglighetsfaktor = maximal producerbar energi med tillgänglig maximal effekt under en viss tidsperiod / maximal producerbar energi med fastställd maximal effekt under total tid under en viss tidsperiod.

I energitillgänglighetsfaktorn beaktas alla förluster i produktionsförmåga, såväl vid stopptid med all effekt icke tillgänglig som vid drift- eller beredskapstid med reducerad effekt tillgänglig (Nordel 1977). Icke tillgänglig energi på grund av årsvis planerade avställningar kan räknas bort och man talar då om Drifttida energitillgänglighet. Detta värde har stor betydelse för anläggningar med långa avställningar.

**tillståndsanalys / condition analysis / Zustandsanalyse**

En tillståndsanalys är en analys genom vilken en komponents, ett systems eller en hel anläggnings tekniska tillstånd (kondition) fastställs. En tillståndsanalys kan utföras i flera steg (olika noggrannhetsnivåer) och kan baseras på loggade driftdata, inspektioner, materialundersökningar, oförstörande och/eller förstörande provning, etc. Tillståndsanalys är synonymt med konditionsanalys.

**tillståndsovervakning / condition monitoring / Zustandsüberwachung**

Med tillståndsovervakning avses kontinuerlig övervakning av en eller flera parametrar (exempelvis tryck, temperatur, töjning, etc.). Baserat på uppmätta värden fastställs vidare en komponents eller ett systems tekniska tillstånd. Tillståndsovervakning är synonymt med konditionsövervakning.

**tryckbärande anordning / pressure equipment / Drucktragende Anordnung**

Tryckkärl, rörledning, säkerhetsutrustning och tryckbärande tillbehör.

Flänsar, stutsar, kopplingar, bärelement, lyftöglor och liknande element, som är sammanfogade med tryckbärande delar, räknas som en del av den tryckbärande anordningen (AFS 1999:4).

**tryckkärl / pressure vessel / Druckbehälter**

En behållare som konstruerats och tillverkats för att innehålla *fluider* under tryck. Till tryckkärl räknas sådana delar som är direkt fogade till behållaren fram till anslutningspunkten till någon annan anordning. Ett tryckkärl kan innehålla ett eller flera rum. (AFS 1999:4).

**tryckbärande tillbehör / pressure accessories / Drucktragende Zubehörteile**

Anordning med driftsfunktion och tryckbärande hölje (AFS 1999:4).

**underhåll / maintenance / Instandhaltung, Unterhalt**

Verksamhet med avsikt att möjliggöra en angiven *prestation* från en *enhet* genom att dess funktionsförmåga vidmakthålls eller återförs till en tidigare nivå. (SS 441 05 05)

Alla åtgärder som utförts i syfte att vidmakthålla en utrustning, eller återställa den, i sådant skick att planerad verksamhet kan genomföras störningsfritt.

**avhjälpande underhåll / corrective maintenance / Beseilende Reparatur**

Med avhjälpande underhåll avses ett underhåll som inte planeras i förväg utan genomförs först när problem uppstår.

Synonymt med korrektivt underhåll.

**förebyggande underhåll / preventive maintenance / Vorbeugende Instandhaltung**

Med förebyggande underhåll avses ett underhåll som baseras på tidigare erfarenheter och som planeras i förväg med syfte att undvika oväntade stopp under drift. Det förebyggande underhållet utförs vid fasta intervall på en tidsaxel.

Synonymt med preventivt underhåll.

**tillståndsstyrt underhåll / predictive maintenance, proactive maintenance / Zustandsbasiertes Instandhaltung**

Med prediktivt underhåll avses ett underhåll som baseras på tillståndsovervakning. Det prediktiva underhållet utförs med rörliga intervall på en tidsaxel.

Synonymt med prediktivt underhåll och proaktivt underhåll.

**drifttidstyrt underhåll / usage based maintenance / Betriebszeitbasiertes Instandhaltung**

En enhet byts ut efter en bestämd drifttid eller om fel uppstår.

Synonymt med åldersbaserat underhåll.



***kalenderstyrt underhåll / calender based maintenance / Kalenderbasiertes Instandhaltung***

En enhet byts ut efter en bestämd tid och repareras om fel uppstår.

Synonymt med blockbaserat underhåll.

***överensstämmelse / conformity / Übereinstimmung***

Uppfyllandet av specificerade krav på en produkt, process eller specificerade anspråk.  
(UTEK 1999)

***översyn / overhaul / Überholung***

Genomgripande undersökningar och åtgärder för att bibehålla krävd nivå på driftsäkerhet och säkerhet för enheten.

NOT 1: Översyn kan genomföras vid föreskrivna tidsintervall eller antal arbetscykler.

NOT 2: Översyn kan kräva komplett eller delvis nedmontering av enheten.

(UTEK 1999)

***övervakning / monitoring / Überwachung, Beaufsichtigung***

Verksamhet som genomförs antingen manuellt eller automatiskt, med avsikt att observera en enhets aktuella tillstånd.

NOT 1: Övervakning skiljer sig från inspektion på så sätt att övervakning används för att utvärdera en enhets egenskapers förändringar över tiden.

NOT 2: Övervakning kan ske kontinuerligt eller efter ett visst tidsintervall eller antal arbetscykler.

NOT 3: Övervakning genomförs vanligtvis under drift.

(UTEK 1999)

**REFERENSER**

AFS 1994:9. Arbetarskyddsstyrelsens föreskrifter om tryckbärande anordningar 1994.

AFS 1999:4. Arbetarskyddsstyrelsens föreskrifter om tryckbärande anordningar 1999.

Nordel 1977. Tillgänglighetsbegrepp för värmekraft, september 1977.

SS 441 05 05. Svenska elektrotekniska normer, SEN, Svensk Standard SS 441 05 05. 1985.

TKN 87. Tryckkärlsnormer 1987. Tryckkärlskommissionen.

UTEK 1999. Svensk version av Europeisk standard i underhållsterminologi, CEN/TC,



# HANDBOK FÖR LIVSLÄNGDSARBETE MED ENERGIANLÄGGNINGAR

Handboken för livslängdsarbete med energianläggningar publicerades 2001 och en andra utgåva utkom 2004. Det var redan från början uttalat att handboken skulle vara ett levande dokument och att regelbundna uppdateringar har stor betydelse för handbokens användbarhet.

Under de 10 år som har gått sedan upplaga 2 gavs ut har utvecklingen varit remarkabel på vissa områden. Det gäller t.ex. metoder för oförstörande provning som ger helt nya möjligheter att kartlägga status hos en komponent med avseende på eventuella skador. Man använder i många fall andra bränslen än för 10 år sedan och nya (eller andra) material har fått användning.

Omfattande forskning pågår. Bara en sådan sak som ytterligare 10 års samlad erfarenhet har stor betydelse för livslängdsarbetet. I den tredje utgåvan har allt detta studerats och sammanställts. I enlighet med tidigare utgåvor är handboken inte bara ett sammanställat tillgängligt informationsmaterial. Det väsentliga är att koppla ihop ny teknik med nyvunna erfarenheter och applicera detta på, samt vidareutveckla, konceptet för livslängdsarbete.

## Ett nytt steg i energiforskningen

Energiforsk är en forsknings- och kunskapsorganisation som samlar stora delar av svensk forskning och utveckling om energi. Målet är att öka effektivitet och nyttiggörande av resultat inför framtida utmaningar inom energiområdet. Vi verkar inom ett antal forskningsområden, och tar fram kunskap om resurseffektiv energi i ett helhetsperspektiv – från källan, via omvandling och överföring till användning av energin. [www.energiforsk.se](http://www.energiforsk.se)