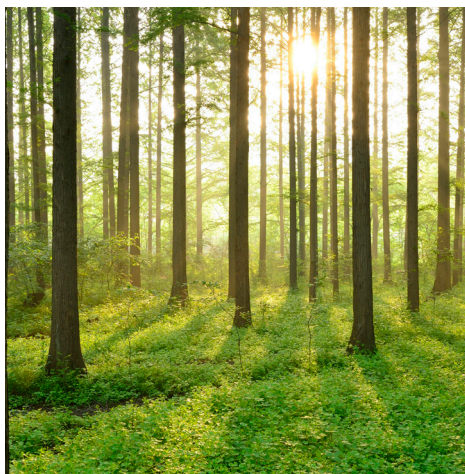


FLEXIBEL DRIFT AV KRAFTVÄRMEVERK

RAPPORT 2016:296



Flexibel drift av kraftvärmeverk

Förstudie

JAN STORESUND

ISBN 978-91-7673-296-0 | © 2016 ENERGIFORSK

Energiforsk AB | Telefon: 08-677 25 30 | E-post: kontakt@energiforsk.se | www.energiforsk.se

Förord

Detta projekt har genomförts som en förstudie där tekniska möjligheter och begränsningar med flexibel drift av kraftvärmeverk har studerats. Förstudien identifierar kritiska komponenter och skademekanismer i kraftvärmeverk som körs cykliskt. Den pekar också på frågeställningar att arbeta vidare med.

Utförare har varit Jan Storesund, Inspecta Technology. Projektet har följts av en styrgrupp med följande medlemmar: Jonas Funkquist, Vattenfall, Fabian Levihn, Fortum, Björn Bursell, Eon, Martin Rokka, Göteborg energi, Anders Stuxberg, Siemens, Joacim Sundqvist, Mälarenergi och Bertil Wahlund, Energiforsk. Energiforsk, som varit sammanhållande, tackar styrgruppen för värdefulla insatser i projektet.

Juni 2016

Bertil Wahlund
Energiforsk AB

Sammanfattning

En förstudie av möjligheter och begränsningar med flexibel drift av kraftvärmeverk har genomförts. Betyddigt minskad andel kärnkraftsel och ökad produktion av väderberoende kraft (vind framförallt men även sol) kommer i framtiden att medföra att reglerbehoven kommer att öka och kraftvärmeverken har bedömts behöva vara delaktiga i denna reglering. Studien redogör för olika typer av reglering och diskuterar hur kraftvärmen kan bidra till detta. Erfarenheterna i Danmark, där vindkraft består av en stor del av elproduktionen, har undersökts. I västra Danmark används kraftvärmen dagligen till både primär och sekundär reglering såväl som till flexibel drift på dygnsbasis.

Lastvariationer, motsvarande tryck- samt temperatursvängningar och ramphastigheter hos svenska anläggningar har studerats och typcykler motsvarande primär- och sekundärreglering såväl som reglering på dygns och veckobasis har definierats för biobränsleeldade CFB-pannor, vilka i först hand kan antas kunna bidra med reglerkraft. Dynamikrespons vid flexibel drift behandlas.

Kritiska komponenter och förekommande skademekanismer som konsekvens av cyklisk drift hos dessa identifieras. Med utgångspunkt från de identifierade typcyklerna har effekterna av tryckutmattning, termisk utmattning och töjningsinducerad korrosionssprickning (SICC) utvärderats överslagsmässigt. Jämförelser görs även med skador och driftsätt som återges i litteraturen.

De slutsatser som kan dras är att:

- En ökad frekvens kallstarter (veckoreglering) kan ge reducerad livslängd hos ångdomar genom töjningsinducerad korrosionsprickning. Fördjupade studier av denna skademekanism och metoder för att reducera dess effekter är viktiga. Även tryckutmattning kan bli kritiskt. Idag finns det etablerade metoder för att hantera tryckutmattning så att lämpliga inspektionsintervall och återstående livslängd kan bestämmas.
- Varmstarter är kritiska i fall av snabba startramper. Det drabbar främst samlingslådor och det finns litteratur på området. En noggrannare utredning av behov av startramper och i vilken utsträckning de kan reducera livslängden vid flexibel drift under svenska förhållanden vore önskvärt.
- Istället för att lastvariationer ska medföra allt för stora temperatur- och tryckförändringar kan olika former dynamisk respons utnyttjas. En fördjupad studie av möjligheter och begränsningar till detta rekommenderas.

Summary

A pre-study has been conducted concerning possibilities and restrictions by flexible operation of combined heat and power (CHP) plants. A significantly reduced share of nuclear electricity production and an increased production of renewable energy is believed to involve increased needs for regulation of variations in the electricity production. It is fully possible that CHP plants have to participate in this regulation. The study reviews different types of regulation and discusses how CHP plants can contribute to this. The experiences in Denmark, where the share of wind power is high, are reviewed as well. In western Denmark CHP plants are used every day for regulation of primary and secondary regulation as well as for flexible operation on 24 h basis.

Load variations, corresponding pressure and temperature cycling as well as ramp rates in Swedish plants have been studied. Typical cases of cycles that correspond to primary and secondary regulation as well as regulation and daily and weekly basis have been defined for bio mass fueled CFB boilers, which primarily are considered to contribute with regulation power. Dynamic response at flexible operation has been reviewed shortly.

Critical components and existing damage mechanisms as a consequence of cyclic operation have been identified. By the identified typical cycles as a starting point the effects of pressure fatigue, thermal fatigue and strain induced corrosion cracking (SICC) been evaluated roughly. Comparisons are also made with damage and operational modes found in the literature

The following conclusions can be drawn from the study:

- An increased frequency of cold starts may result in reduced lifetimes for drums due to strain induced corrosion cracking. Deeper studies of this damage mechanism and methods to reduce its effects are important. In addition, pressure fatigue may be critical. Methods for determination of inspection intervals and remaining lifetime assessments are established for pressure fatigue.
- Warm starts may be critical in case of fast increases in temperature. Super heater boxes are predominantly affected and the literature concerning this is quite significant. However, more detailed investigations of the need for fast start ramps and in which extent they can reduce the life time at flexible operation in Sweden are desirable.
- Instead of load variations resulting in too large temperature and pressure alternations different ways of dynamic response may be utilized. A thorough study of the possibilities and restrictions of this is recommended.

Innehåll

1	Bakgrund	9
2	Omfattning och genomförande	10
3	Litteraturstudie	12
3.1	Primärreglering	12
3.2	Sekundär reglering	14
3.3	Dygnsreglering	15
3.4	Reglering av variationer av vindkraft i Danmark	16
3.5	Inverkan av Flexibel drift på utmattningslivslängd	19
4	Typfall för reglering med kraftvärme	20
4.1	Ryaverket gaskombi	20
4.2	Händelöverket P13	20
4.3	Arosverket P5	21
4.4	Förslag på typcykler	21
5	Inverkan av flexibel drift på mekaniska komponenter - skademekanismer	22
5.1	Tryckutmattning	22
5.1.1	Kritiska komponenter	23
5.1.2	Hantering av risk för tryckutmattning	23
5.2	Termisk utmattning	25
5.2.1	Kritiska komponenter	25
5.2.2	Hantering av risk för termisk utmattning	27
5.3	Töjningsinducerad korrosionssprickning	28
5.3.1	Kritiska komponenter	29
5.3.2	Hantering av risk för SICC	31
6	Möjligheter till dynamikrespons vid flexibel drift	32
6.1	Grundprinciper kraftvärme	32
6.2	Hybridlösningar	33
7	Fortsatta studier	35
8	Slutsatser	37
9	Referenser	38

1 Bakgrund

Det är möjligt att biobränsleeldade kraftvärmeverk kommer att bidra till att reglera variationer i elproduktionen, och därmed köras mer flexibelt (cykliskt). Det ger frågeställningar kring vad biobränsleeldade kraftvärmeverk kan leverera i form av reglerkraft och framförallt vad det innebär tekniskt och driftsmässigt för kraftvärmeverket. I föreliggande projekt genomförs en förstudie i syfte att se över behov, möjligheter och utmaningar för flexibel drift av termiska kraftvärmeverk. Arbetet omfattar även bedömningar av behov av projekt som mer djupgående belyser frågeställningen.

2 Omfattning och genomförande

Utgångspunkten för studien är vad biobränsleeldade kraftvärmeverket kan leverera i form av reglerkraft (primär, sekundär och tertiär reglerkraft, men även över dygn) och framförallt vad det innebär tekniskt och driftsmässigt för kraftvärmeverket. Förstudien belyser följande frågor:

- Baserat på litteraturstudier, undersöka hur problematik med flexibel drift hanteras i vår omgivning, framförallt i våra grannländer
- Drift. Hur ska nya och befintliga anläggningar optimeras och designas för flexibel drift, exempelvis:
 - × ska anläggningar optimeras för lägre elverkningsgrad med möjlighet till snabbare effekthöjning
 - × hur kan anläggningar hantera låga/höga elpriser – kan det hanteras med variationer i fjärrvärmelast?
- Teknik (material, process). Vilka utmaningar innebär en mer flexibel drift av anläggningen, exempelvis genom ökad påkänning och slitage, och vilka tekniska krav ställs på anläggningen för att kunna möta utmaningarna
- Undersöka förutsättningar och behov av ett projekt som mer djupgående belyser frågeställningen”.

Inspecta Technology har genomfört två Värmeforskprojekt [1],[2] som beskriver skademekanismer som kan bli mer kritiska vid cyklisk drift och hur man kan ha kontroll över dessa, hur återstående livslängd hos olika komponenter påverkas samt åtgärder för livslängdsförlängning. Inspecta Technology har därför blivit tillfrågade att genomföra föreliggande förstudie. Med utgångspunkt från en uppdragsbeskrivning utfärdad av Energiforsk har Inspecta Technology föreslagit och fått beställt ett projekt med följande genomförande:

De tekniska och driftmässiga konsekvenserna av cyklisk drift av en anläggning är beroende av hur den körs. Det är därför viktigt att identifiera behoven av reglerbarhet samt kraftvärmeverkens möjligheter att matcha dessa behov. Vilken typ av reglertjänster (driftcykler), dvs. primär-, sekundär- eller tertiärreglering, tidsskalor (sekunder, timmar minuter eller dagar) som kan bli aktuella, behöver definieras och klarställas.

De driftcykler som de identifierade behoven innebär, behöver därefter översättas till motsvarande variationer i tryck, temperatur, flöden och miljö hos de system och komponenter i pannan som kan förväntas påverkas av den flexibla driften.

En detaljerad sådan kartläggning kan befaras bli mer omfattande än vad ramen för förstudien tillåter. Därför görs i förstudien en konservativ screening. Fördelen med detta är att det redan på det här stadiet kan bedömas om det finns typer av driftcykler som inte medför några betydande tekniska eller driftmässiga konsekvenser.

För mer krävande former av cyklisk drift görs systematiska bedömningar av:

- Reduktion av livslängd hos kritiska komponenter
- Behov av underhåll och kontroll
- Möjligheter till anpassad design
- Möjligheter till optimerad drift
- Behov av högre tekniska krav

Vid det här stadiet kommer det att kunna tydliggöras inom vilka områden det vore värdefullt med fördjupade studier i syfte att kunna göra önskvärda bedömningar.

Som underlag till förstudien används de Värmeforsk- och Fjärrsynrapporter som har publicerats på området. Information införskaffas även från grannländers erfarenheter av att hantera reglering av variationer i elproduktion. Projektet NEPP har analyserat driftsfall i framtiden. Information från detta projekt inhämtas med hjälp av Energiforsk.

En styrgrupp har tillsatts för projektet med följande uppgifter:

- Styra projektets inriktning och prioritera relevanta och intressanta delar som bör medtas.
- Bistå att identifiera behov och definiera typfall av förväntade driftcykler.
- Säkerställa projektets relevans.
- Följa upp och godkänna rapport.

Efter inledande styrgruppsmöten beslöts följande avgränsningar:

- Förstudien ska i första hand beakta flexibel drift hos en biobränsleeldad CFB-panna
- Typfall för primär- och sekundärreglering samt kall- och varmstart ska identifieras.
- Primär frekvensreglering påverkar troligen inte pannan så mycket (små variationer) men vad som behövs för att kunna delta i regleringen beskrivs.

3 Litteraturstudie

Internationellt finns det omfattande litteratur som behandlar olika aspekter av flexibel drift, framför allt rörande reglering av produktionen, hur anläggningar påverkas av en ökad frekvens av kall- och varmstarter, förbättrad dimensionering samt kostnader för reducerad livslängd av kritiska komponenter och för modifieringar av anläggningen för att kunna reglera den flexibla driften. Det ligger utanför projektets ramar att få ett grepp över den samlade litteraturen på området. Föreliggande förstudie begränsas till litteratur som belyser förhållandena i Sverige samt även en utblick till våra grannländer.

En grundläggande fråga är vilka behov av reglerkraft som kommer att bli aktuella och hur kraftvärme kan bidra till att reglera dessa behov. Utbyggnaden av förnybar energi från sol och vind ses ofta som den mest konkreta källan till att behoven av reglerkraft kommer att öka påtagligt efter-som produktionen av dessa energislager varierar. Svensk Vindenergis prognos visar att vindkraftselen kommer att öka från 11,5 TWh år 2014 till cirka 20 TWh år 2020. Det motsvarar ca 15 % av landets elanvändning. Idag klarar vattenkraften att reglera variationer i vindkraftsproduktionen genom magasinering. Vattenkraften har även klarat att reglera ett stopp av en kärnkraftsreaktor [3]. Inte desto mindre är det fullt möjligt att behoven av reglering av förnybar energi kommer att öka inom en relativt snar framtid. Ser man längre fram än till 2020 är blir troligen behovet av att kunna reglera förnybar energi ännu större eftersom utfasningen av kärnkraftsreaktorer som har förbrukat sin livslängd kan komma att tidigareläggas pga. olönsamhet. Den masströghet som finns i dagens elsystem kan därmed förväntas minska varpå behovet av reglerkraft ökar [4].

Hur stort behovet av att kraftvärmeverk ska kunna bidra till regleringen är beroende av faktorer som inte säkert går att förutsäga idag, t.ex. var vattenkraften kommer att byggas ut - en stor geografisk spridning minskar reglerbehoven, teknisk utveckling och hur överföringskapaciteten i elnätet anpassas [5].

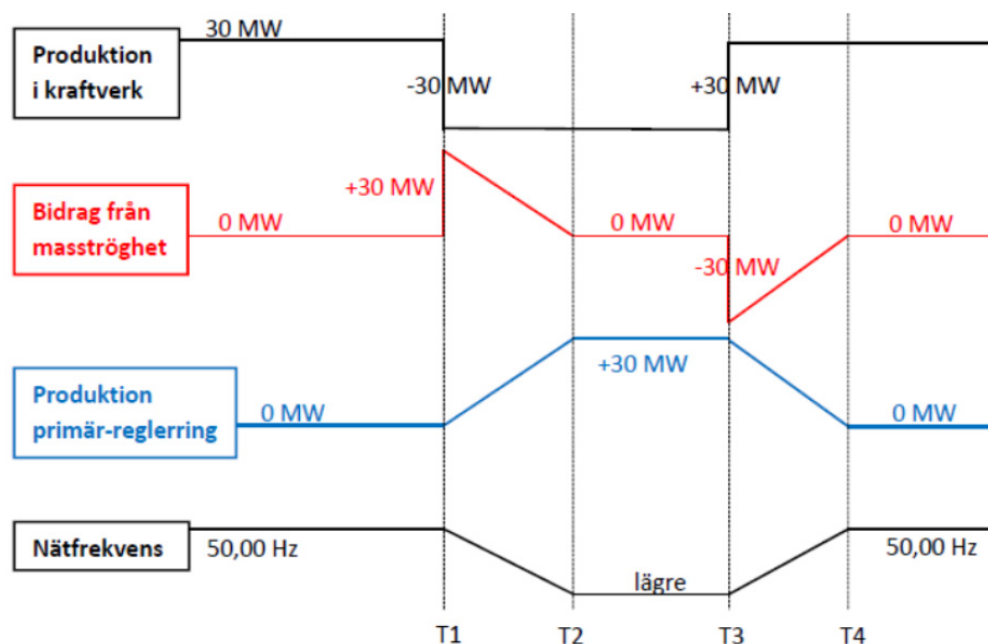
Kraftvärmen körs för närvarande relativt stabilt och på en nivå som är kopplat till fjärrvärmeförbrukningen. Detta gör att produktionen är högre på vintern än på sommaren. Kraftvärmen kan antas vara reglerbar på olika sätt. Man kan också anta att hög produktion av sol- och vindkraft medför att man hellre stänger av kraftvärmeverk än vind- och solkraft eftersom man då sparar bränsle i kraftvärmeverken (undantaget avfall eftersom energibolagen får betalt för att förbränna det).

3.1 PRIMÄRREGLERING

Stamnätsoperatörer (såsom Svenska kraftnät) övervakar elsystemet och ser till att elproduktionen motsvarar elförbrukningen varje timme. Det huvudsakliga verktyget för övervakningen är frekvensen; när produktion motsvarar förbrukning i det nordiska systemet är frekvensen 50,00 Hz. Om frekvensen till exempel faller (förbrukning är större än produktion) måste frekvensen regleras genom att produktionen ökas, och tvärtom. Finjusteringen av frekvensen (primärregleringen) sker idag med automatik och i huvudsak genom att vattenkraftverken producerar mer eller mindre el.

Det finns krav på att det måste finnas en viss mängd masströghet i kraftsystemet för att kunna parera mot störningar som uppkommer. Det sker genom synkronmaskiner kopplade direkt till elnätet. Vind- och solkraftverk inte är idag inte utrustade med det.

Figur 1 visar vad som händer vid förändringar av effektbalansen [6]. Masströghet hos synkronmaskiner kan bara bidra till upprätthållande av balans under en relativt kort period, i storleksordningen 10 s, men det har ändå mycket stor betydelse. Från figuren framgår det att bidraget från masströghet upprätthåller balansen under perioden då produktionen från primärreglering startar upp respektive slås av, vilket också sker inom ett mindre antal sekunder.



Figur 1 Schematiskt åskådliggörande av hur balans upprätthålls i ett energisystem [6].

Norden (förutom västra Danmark och Island) har ett gemensamt elnät med samma frekvens, 50 Hz, och den samlade svängmassan gör att ändringar inte går så fort. Idag regleras detta av automatiskt vattenkraften.

Vid förhöjd frekvens ska uteffekten dras ner och vice versa. Proportionaliteten mellan effektändring och frekvensavvikelse kallas reglerstyrka och mäts i megawatt per hertz (MW/Hz). Den anger hur mycket turbinen ska öka sin produktion för varje Hz som frekvensen sjunker. Statik är ett annat sätt att ange ett aggregats reglerstyrka. Statiken anges i procent och

är den procentuella frekvensavvikelse, Δf , som krävs för att förändra maskinens uteffekt, ΔP , med 100 % av märkeffekten. Den beräknas som frekvensavvikelse (i % av 50 Hz) delat med effektavvikelse (i % av märkeffekt):

$$\text{statik} = \frac{\Delta f [\%]}{\Delta P [\%]}$$

Typiska värden på statiken hos ett aggregat är 2 till 8 % [7].

Svenska kraftnäts författningssamling, SvKFS 2005:2, [8] beskriver reglerformen "Automatisk kontinuerlig frekvensreglering" i 5 kap. 5§. Följande gäller för kraftvärmeaggregat (synkrongeneratorer) ≥ 25 MW:

Aggregatet ska kunna bidra med primärreglering med en statik på 2-8 % vid en frekvensvariation inom $50 \pm 0,2$ Hz. Aggregatet ska klara upprepade effektvariationer kring inställt börvärde. Uteffekten skall kunna regleras med ± 2 % inom 30 sekunder inom effektområdet 60 – 90 % (av nominell aktiv turbineffekt) och detta skall kunna upprepas flera gånger.

Det bör dock noteras att dessa siffror inte kan användas helt förbehållslöst då en frekvensavvikelse på 0,2 Hz teoretiskt motsvarar en uteffektändring på 20 % vid 2 % statik och en ändring på 5 % vid 8 % statik [7]. En lämplig kombination av statik och reglerområde behöver alltså beräknas för det aktuella aggregatet.

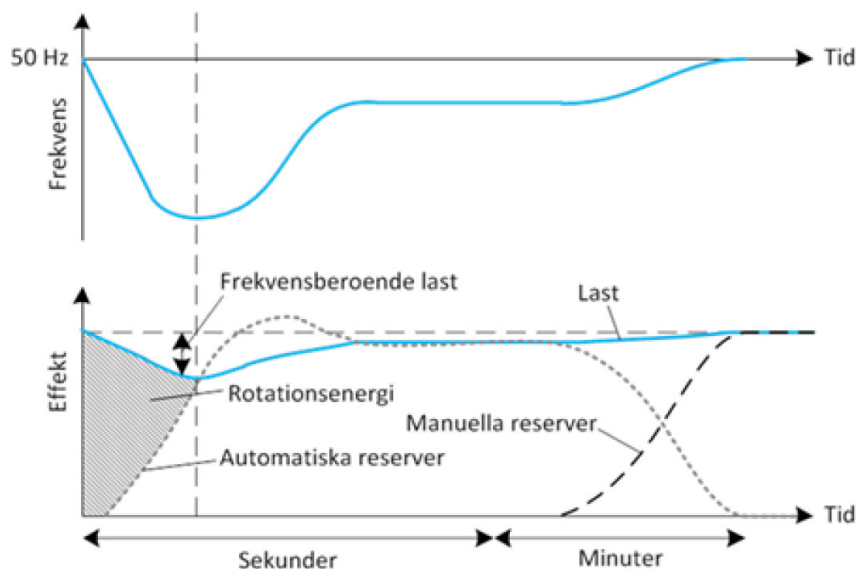
Vid upphandling av primärreglering är det dock andra siffror som gäller. I faktabladet från Svenska Kraftnät, SvK, rörande regler för upphandling av primärreglering (2012) [9] listas följande tekniska krav för Frekvensstyrd Normaldriftsreserv (FCR-N):

- Aktivering av FCR-N ska ske vid frekvensavvikelser från 50,0 Hz inom intervallet 49,9 Hz till 50,1 Hz.
-
- FCR-N skall, vid en stegvis förändring av frekvensen från 50,0 till 49,9 Hz, vara aktiverad till 63 % inom 60 sekunder och 100 % inom 3 minuter. För Frekvensstyrd Störningsreserv (FCR-D), som ska aktiveras under 49,9 Hz, krävs dock kortare responstid.

Möjligheter för svenska kraftvärmeverk att leverera primär frekvensreglering, FCR-N, har studerats ingående i Värmeforskningsprojekt 1261 [7]. Man har studerat fem olika typanläggningar: bioeldat, avfallseldat, gaskombi, massa-pappersbruk och industrigaseldat. Vad gäller biobränsleanläggningen bedöms den vara väl lämpad för primärreglering. Pannan anses vara snabb och det finns en ackumulator som kan hantera variationer i leverans till fjärrvärmenätet. Ett argument mot att kraftvärmeverk skulle bidra till primärreglering är att dessa har normalt sin bästa verkningsgrad vid maximal uteffekt, varför en driftmässig marginal för primärreglering skulle inkräkta på produktionsekonomin och energieffektiviteten [6].

3.2 SEKUNDÄR REGLERING

Syftet med sekundär reglering (långsam reglering, inom några till max 30 minuter) är att återställa balansen i systemet på längre sikt. Sekundärregleringen kan antingen skötas automatiskt eller manuellt [10]. Det Nordiska kraftnätet sköts manuellt men en funktion för automatisk sekundärreglering (FRR-A) är under utprovning i syfte att öka frekvenskvaliteten. Figur 2 visar samband mellan samverkan mellan produktions-/förbrukningsändring, masströghet (rotationsenergi) samt primär- och sekundärreglering [11].



Figur 2 Beskrivning av samverkan mellan automatiska och manuella reserver vid en momentan minskning av produktion (eller ökning av förbrukning) [11].

3.3 DYGNSREGLERING

Stora totala produktionsförändringar från vind kan ske inom någon eller några timmar även om det vanligen sker inom 3-12 timmar. Det är svårt att prognosticera exakt tidpunkt för skeendet. En ökad mängd svårprognostiserad vind- och solkraft försvårar vattenkraftplaneringen. Utveckling av reglerförmågan i värmekraftproduktionen ses som en potentiell lösning [6]. I Svenska Kraftnäts rapport "Perspektivplan 2025" från 2013 [12] konstateras att de reglerresurser som behövs på produktionssidan vid en kraftig vindkraftsutbyggnad i framtiden främst ska vara av den typ som är aktiverbar inom en timme. Enligt rapporten förväntas förbrukningssidan få en allt viktigare roll som reglerresurs i framtiden, bl.a. genom smarta nät ("smart grids").

Vindproduktion kan variera från ett lågt värde till ett högt värde (eller vice versa) på några få timmar. Det går att göra produktionsprognoser för nästa dygn och på så sätt planera reglerkapacitet inför kommande variationer, men träffsäkerheten i vilken timme en ändring sker är ganska osäker varför också reglerkapacitet måste finnas för att hantera prognosfel inom dygnet. Variationer i vindkraftsproducerad el kan alltså antas att även behöva regleras genom dygnsreglering, medförande att varmstarter kommer in i bilden. Andra incitament för dygnsreglering är att produktion av kraftvärme endast lönar sig när elpriserna är höga under morgon och kväll. Bland annat i Storbritannien och i Danmark har man betydande erfarenheter av sådant driftsätt.

Flera vetenskapliga publikationer stödjer och diskuterar integrationen av kraftvärme och värmepumpar mot en mer rörlig elmarknad med större andel intermittent kraftproduktion, exempelvis vindkraft. Lund et al [13] har konstaterat att i framtiden blir det allt viktigare att optimera multipla energisystem både tillsammans och enskilt. Kraftvärme och värmepumpar är viktigt för att fjärrvärme ska kunna göra detta, men det krävs att det kombineras med värmelager.

Rinne och Syri [14] visade på motsvarande sätt rollen som kraftvärme i kombination med värmelager skulle kunna ta för att balansera stora andelar vindkraft i det finska

elnätet. Magnitud och antal svängningar utav elpriset avgör körningen av värmelager och ju större svängningarna är, desto mer ökar värdet av ett värmelager. Rinne och Syri framhåller även att ökad flexibilitet hos kraftvärmeverk involverar kortare ramptider samt mer frekventa starter och stopp som står i relation till reducerad livslängd och ökade kostnader.

Behovet av flexibla el-netto (köpt el – inmatad el) i relation till mer intermittent kraftproduktion har tidigare diskuterats av bland annat Lund et al [15]. De visade framförallt nyttan av flytta last i tiden med hjälp av värmelager i kombination med kraftvärme och värmepumpar.

En studie av Åberg et al [16] diskuterar dock känsligheten i att köra kraftvärmeverk i relation till ett varierande elpris. De konstaterar att lönsamheten för kraftvärmeverk kan bli utmanande, samt att det kan bli behov av att dumpa värme vintertid för att kunna producera elkraft. Författarna reflekterar dock inte över möjligheten i att "dumpa" värmen till värmelager.

I [6] antas i ett basfall att det under varje timme finns en möjlighet att minska kraftvärmeproduktionen ner till 25 procent av ursprungsnivån när detta är möjligt ur systemsynpunkt (masströghet) och man annars skulle vara tvungen att underutnyttja vindkraft eller solkraft. Det är realistiskt eftersom elproduktionskurvor redovisas där detta har inträffat under en blåsig natt i januari 2011.

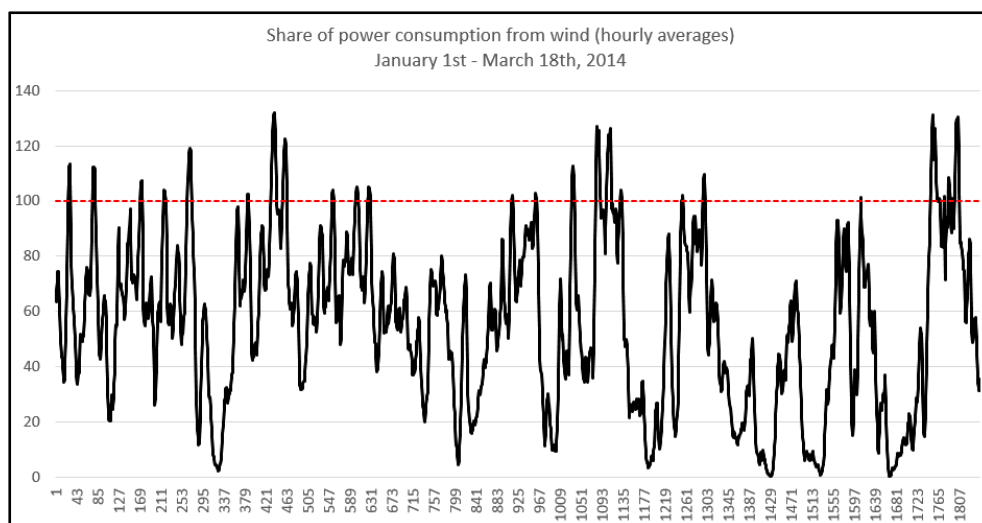
3.4 REGLERING AV VARIATIONER AV VINDKRAFT I DANMARK

En studie av Sorknaes et al [17] visade potentialen för kraftvärme att balansera intermittent kraftproduktion i Danmark, men pekar samtidigt på lönsamhetsproblem om inte kraftproduktionen från kraftvärmeverk kan optimeras och köras flexibelt mot elpriset. Då blir ett flexibelt elnetto och kostnaden för att producera mot olika elnetto viktigt. Detta resonemang stöds även av resultat från Nuytten et al [18] och Ommen et al [19].

I en skrift från Cepos (Center for Politiske studier) från 2009 [20] utvärderas den danska vindkraften. Det fastslås att vindkraftsproduktionen är stokastisk, särskilt på basis inom 15 minuter, 30 minuter eller en timme. När det är blåst produceras mer el än vad som kan konsumeras och export sker till Norge, Tyskland och Sverige. När det blåser lite importeras vattenkraftsel från samma länder. Eftersom gridsystemen är mycket större i dessa länder än i Danmark kan den danska vindkraftselen absorberas i dessa system.

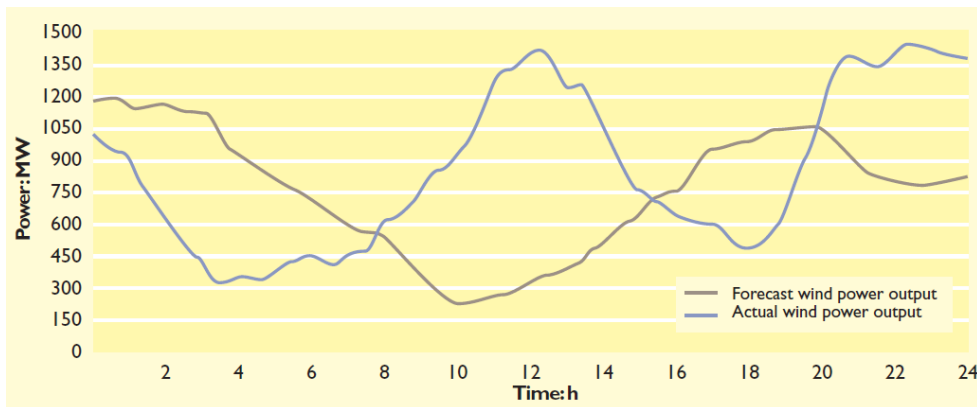
Danmark är indelat i två elområden, DK1 och DK2, vilka omfattar Jylland och Fyn respektive Själland m.m. (västra respektive östra elområdet). Östra området är förbundet med det samnordiska synkrona systemet medan västra området är sammanbundet med det kontinentala systemet. Likströmsförbindelser finns även med Norge, Sverige och Tyskland. Det ger olika förutsättningar för reglerkraft. Det östra området regleras i huvudsak med vattenkraft medan det västra området övervägande regleras med kraftvärme.

I Danmark svarade 2014 vindkraftsel för 37 % av det totala behovet. Stundtals svarar vindkraften för 100 %, se figur 3. Från figuren kan man se att behovet av reglering av vindkraften är stort.



Figur 3 Andel elkonsumtion från vindkraft i Danmark från januari till i mitten av mars 2014 [21].

Man lägger stor vikt vid prognostisering av vindstyrkan för reglering av vindkraften. I intervallet 5-15 m/s motsvarar, med nuvarande utbyggnad av vindkraften, varje meter per sekund vindstyrka 350 MW [22]. Många gånger har det visat sig vara svårt att prognostisera elproduktionen från vindkraft men modellerna förbättras. Figur 4 visar ett exempel från 2002 på prognosticerade svängningar och det verkliga utfallet [23].



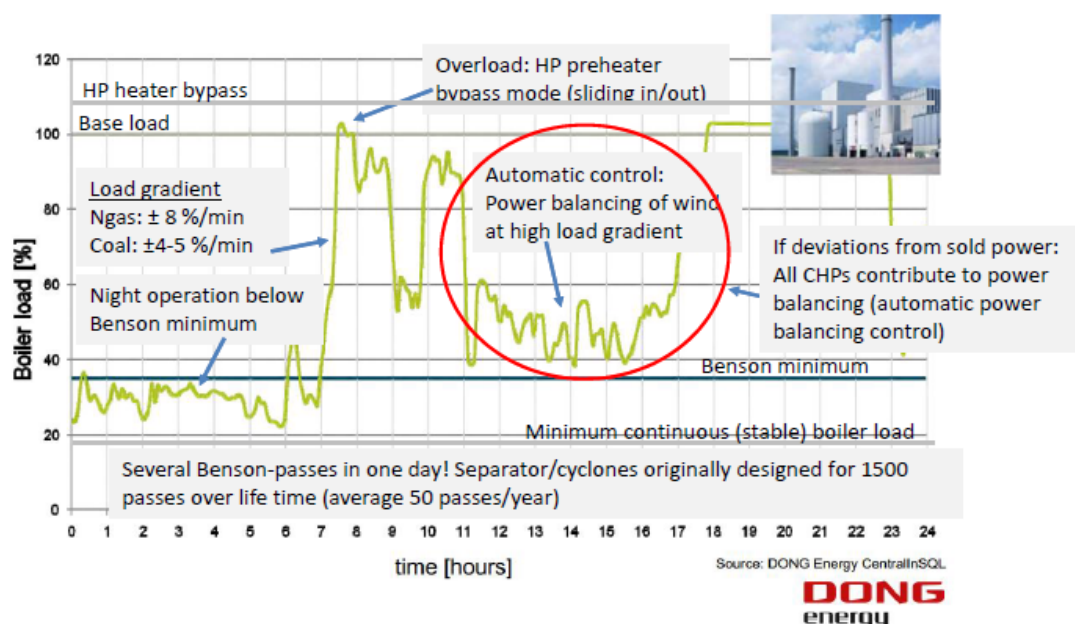
Figur 4 Prognos och utfall av vindkraftsproduktionen i västra Danmark under ett dygn i oktober 2002 [23].

I Danmark har man arbetat i 15 år med att utveckla möjligheterna att reglera variationer i vindkraftsproduktionen med kraftvärme.

Simuleringsmodeller för prognos, prognosfel och styrning av kraftreglering har utvecklats på DTU där kraftvärmeverk är inblandade i primär- och sekundärreglering [22]. Inte minst i fall av felprognosering spelar reglering med kraftvärme en stor roll.

De stora energibolagen har utvecklat system för automatisk primär- och sekundärreglering. Reglering på dygnsbasis sker manuellt. Det är främst de större kraftvärmeverken, med 400 MW i huvudsak fossilt eldade genomströmningspannor som används till regleringen. Uppstår behov av reglering kopplas den billigaste pannan in först osv. tills behovet är uppfyllt. Figur 5 visar ett exempel på

effektvariationerna hos ett kraftvärmeblock under en 24 timmarsperiod [21]. Exemplet visar (automatisk) reglering av hög men i viss mån varierande vindkraftsproduktion under dagtid. De största lastgradienterna är dock mellan låg nattproduktion till hög last pga. ökat behov och därmed högre priser morgon och kväll. Både vid låglast under natten och vid höglast morgon och kväll under- respektive överskrider den min- och maxlast som pannan är konstruerad för. I det här exemplet är det alltså maximerad produktion då elpriserna är höga och samt minimerad bränsleförbrukning när elpriserna är låga och inte regleringen av vindkraft som ger de största påkänningarna hos pannan.



Figur 5 Exempel på effektvariationer hos ett danskt kraftvärmeblock under ett dygn [21].

Den flexibla driften är nödvändig för lönsam drift av kraftvärmeverken. Andelen vindkraft är planerad att öka från dagens 36 % till 50 % år 2020. Det skulle innebära att ännu hårdare press för att nå lönsamhet hos kraftvärmerna. Målen med den flexibla driften kan sammanfattas med att maximera vinsten på innevarande marknad och att behålla lönsamhet hos kraftvärmeverken.

Under Vattenfalls period som ägare av kraftvärmeverk i Danmark utvecklades följande funktioner för flexibel drift [24]:

- Helt automatisk lastkontroll för leverans av automatisk sekundärreglering i syfte att minimera obalanserna systemet.
- Optimerad styrning med parameteranpassning för låglastdrift.
- Automatisk överlastmodulering (bypass av HT förvärmare).
- Automatisk styrning av fjärrvärmeproduktionen i syfte att förbättra styrningen av elektrisk last genom användning av ackumulatorer.
- On-line beräkningar av gränser för laster och gradienter.
- Automatisk prioritering av primärstyrning inbyggt i enhetens Master Controllers för att kunna primärreglera tillsammans med sekundärregleringen.

En studie av Münster et al [25] undersökte robustheten i olika kombinationer av produktion i fjärrvärmesystem för Danmark. Enligt dem är det en pågående trend där

storskaliga värmepumpar installeras, vilka kan dra nytta av perioder av överkapacitet av vindkraft. Den totala andelen kraftvärme i Danmark kommer minska, men kombinationen av avfallskraftvärme och värmepumpar är robust mot alla bränslepriser, elpriset och CO₂-priser, enligt deras studie. Endast hotet från småskaliga värmepumpar är en osäkerhet. Det framhålls dock att det är viktigt att trögheten i fjärrvärmenäten tillsammans med värmelager utnyttjas för att ge flexibilitet.

3.5 INVERKAN AV FLEXIBEL DRIFT PÅ UTMATTNINGSLIVSLÄNGD

Inverkan av flexibel drift på utmattningslivslängden hos olika komponenter i en anläggning kan vara svår att generalisera pga. skillnader i konstruktion mellan olika typer av anläggningar och även mellan olika pannor av samma typ. VGB Power Tech har genomfört omfattande modellering av flexibel drift ur olika aspekter och bl.a. studerat hur utmattningslivslängden påverkas av flexibel drift pga. reglering av vindkraft på dygnsbasis hos en genomströmningsspanna med stenkolk som bränsle [26]. Pannan är på 550 MW, 262 bar samt 545°C och 565°C hos utgående respektive mellanöverhettad ånga. Varmstart definieras med att tryck och temperatur är 4-60 bar respektive 140-410°C vid starten. Lägre temperatur än 140°C räknas som kallstart högre än 410°C räknas som het start. I deras exempel tar en normal varmastart från ca 200 till 545°C hos utgående ånga ca fem timmar. I början finns dock en stor gradient från ca 200°C till 420°C på endast 20 minuter. Lasten ändras från 60 % till 100 % av full last. Man modellerar sedan även effekterna av forcerade varmastarter där forceringen finns i den del där rampningen går snabbast. Eftersom det inte finns ångdomar i genomströmningsspannor är det överhettarnas samlingslådor som är mest kritiska. I normalfallet får de, enligt beräkningsresultaten, en betryggande utmattningslivslängd. Vissa fall av forcerade varmastarter reducerade dock livslängden till ca 2000 varmastarter, vilket skulle medföra att lådorna skulle behöva bytas kanske vart tionde år i fall av frekventa varmastarter.

4 Typfall för reglering med kraftvärme

Driftdata från Göteborg Energi, Ryaverket (gaskombi), Händelöverket, Panna 13 (CFB) och Mälarenergi, Arosverket, Panna 5 har erhållits av medlemmar i projektets styrgrupp i syfte att studera hur lastväxlingarna ser ut under vintern- våren 2016. Studier eller expertis som beskriver hur stora effektvariationer som kan förväntas blir aktuella hos kraftvärmeverk om de bidrar till reglering av variationer av förnybar energi har inte påträffats.

Fakta från litteraturunderlag att hålla sig till är en effektändring på maximalt 20 % (vid 2 % statik) och ska vara aktiverad till 63 % inom 60 sekunder och 100 % inom 3 minuter för att svara mot SvKs krav på primärreglering. För de olika anläggningarna studerades vilka variationer i tryck och temperatur samt ramtider förekommande effektvariationer i drift medförde.

Efter en sammanställning av dessa togs typfall av driftcykler fram som kan svara mot primär-, sekundär- och dygnsreglering av elproduktionen. Det är alltså driftcykler där effektvariationerna medför momentana tryck- och temperaturvariationer hos pannorna. I steget därpå undersöks om dessa variationer kan medföra reducerad livslängd hos de olika komponenter som anläggningen består av.

4.1 RYAVERKET GASKOMBI

Data från Ryaverkets avgaspanna omfattar loggning av driftdata i en-minutsintervall under en period av 4 dygn och 10 timmar. Under denna period finns både större och mindre effektvariationer. Det finns sådana som är omkring 20 %, vilka är intressanta med tanke på maximala effektvariationer för primärreglering enligt SvKs krav. De medför tryck- och temperaturändringar hos HT-ånga på ca 15 bar respektive 30°C på ca 10 minuter.

De större cyklerna åstadkoms med tillsatseldning. Ångeffekten varierar från 40-150 MW ca var 12:e timme. Motsvarande variationer av tryck och temperatur är 50-95 bar respektive 480-540°C på utgående ånga. Tryck- och temperaturökningen tar ca 75-120 minuter respektive 90-105 minuter för plottade cykler.

Dessutom har Ryaverkets gasturbiner stor kapacitet för reglering av frekvensavvikels där 70 % laständring kan ske inom 10 sekunder.

4.2 HÄNDELÖVERKET P13

Data från P13 omfattar loggning av driftdata i en-timmesintervall under en period av tre månader (20151201-20160228). Effektvariationer på 20 % motsvaras här av 5 bar och 5°C i tryck och temperatur. Det finns även återkommande lastreduktioner från normal drift på ca 127 till 50-70MW pga. översyn av bibränsleinmatningens siloskruv (varannan eller var tredje vecka). Pannans effekt blir då starkt reducerad (enbart inmatning av bränsleslaget gummi är igång). Dessa lastvariationer medför tryck- och temperaturändringar hos HT-ånga på max 10 bar respektive 30°C.

4.3 AROSVERKET P5

Från Mälarenergi erhöles för panna 5 loggade data med en mints intervall för perioden 2016-03-17 till 2016-03-30. Under de första 7 dyggen inträffade 20 laständringar, 2-4 per dygn, som var relativt snabba och på 15 MW eller mer. Därefter var det endast två signifikanta lastvariationer. De var dock de två tuffaste, den ena en lastminskning från 173 till 118 MW under 40 minuter, resulterande i ett temperaturfall på 60°C. Den andra var en lastökning på 35 MW medförande 75°C temperaturökning under 1 timme och 34 minuter. Den typiska cykeln var en ökning eller en minskning av last med 20-30 MW och temperatur med 30-40°C under 40-60 minuter. Domstrycket varierade relativt lite, mindre än 5 bar under typiska cykler och 5-10 bar vid de tuffaste cyklerna.

De största temperaturvariationerna fanns vid mellanöverhettningen. Utgående ånga hade i det närmaste konstant temperatur vid lastvariationerna.

4.4 FÖRSLAG PÅ TYPCYKLER

De cykler som förekommer är ur skadlighetssynpunkt sannolikt inte värre än att respektive panna klarar dessa ganska bra och utan allt för svåra påkänningar. Därför föreslås typcykler som kan liknas vid "worst cases" för att om och i så fall vilka effekter det skulle ge. Kraftigare variationer än vad som kan ses hos avgaspannorna i gaskombiverket kan det sannolikt ändå inte bli fråga om för en CFB panna med max effekt på 140 MW samt drifttryck och -temperatur på 140 bar och 540°C. Föreslagna cykler ges i tabell 1.

Tabell 1 Förslag på cykler för reglerkraft hos en CFB-panna med driftdata på 140 MW, 140 bar och 540°C.

Typ av reglering	Effektvariation [MW]	Tryckvariation [bar]	Temperatur- variation [°C]	Rampning [min]
Primär	30	5	30	3
Sekundär	40	10	40	20
Dygn	110	20	100	1 h
Varmstart	140	140	340	2 h
Kallstart	140	140	440	12 h

5 Inverkan av flexibel drift på mekaniska komponenter - skademekanismer

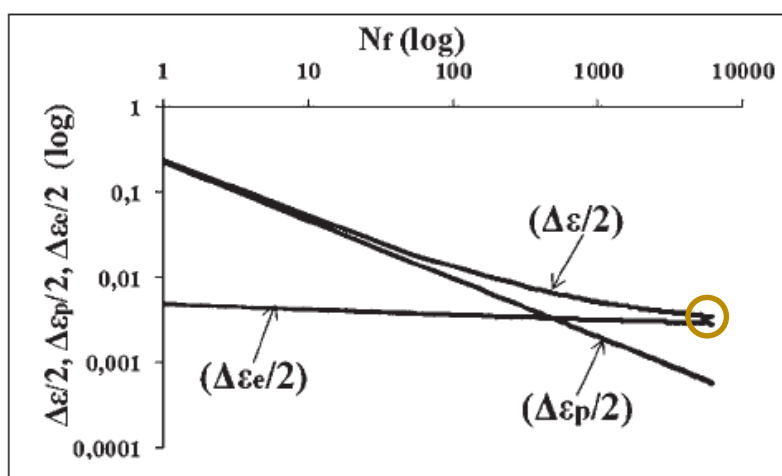
Variationer i tryck och temperatur för med sig risk för cykliska spänningar hos mekaniska komponenter som kan leda till sprickbildning. De skademekanismer som i första hand skulle kunna aktiveras är utmattning och miljöinducerad sprickbildning i olika former. Viktiga parametrar är cyklernas omfång, frekvens och ramphastighet.

Sprickbildning på grund av cykliska tryck- och temperaturvariationer uppstår typiskt i tjockväggiga komponenter, dvs. ångdomar, fördelnings- och samlingslådor samt ventiler. Geometrier som medför termiska spänningar vid uppvärmning och skarpa hörn och kanter som medför spänningskoncentrationer är känsliga. Typiska exempel på kritiska positioner är skarpa dimensionsövergångar där tunt gods möter ett tjockt respektive genomföringar i domar och lådor.

Även eldstadstuber kan få sprickor som är relaterade till cyklisk drift. Sprickorna uppstår då vid geometrier och positioner där det finns spänningskoncentrationer, t.ex. i hörn, fogar mellan tak och sidovägg, avväxlingstuber m.m.

5.1 TRYCKUTMATTNING

Tryckvariationerna i drift är kopplat till tryckutmattning. För stål finns det en utmattningsgräns, vilket innebär att tryckomfånget i kombination med medelspänningen måste uppnå tillräckligt höga nivåer för att utmattning ska kunna initieras. De högsta spänningarna uppstår vid fulla lastcykler vid genomföringar i ångdomar där de kan bli i höjd med och även strax över sträckgränsen. En liten plasticering sker i så fall vid den första eller de första cyklerna. Materialet hårdnar och tryckvariationerna är spänningsstyrda så vid efterföljande cykler nås den av hårdnandet förhöjda sträckgränsen nätt och jämnt. Även vid så här hårda påkänningar krävs det relativt många cykler innan livslängden är slut. Figur 6 visar resultat av lågcykelutmattning (dvs. utmattningscykler som inkluderar plastisk töjning) av en svets av ett höghållfast stål.



Figur 6 Antal cykler till brott som funktion av total, plastisk (p) och elastisk (e) töjningsamplitud ($\Delta\epsilon/2$) hos en svets av höghållfast stål [27]. Vid inringningen är det plastiska töjningsbidraget mycket litet.

Man kan se att livslängden är ca 8 000 cykler då töjningen tangerar nätt och jämt tangerar sträckgränsen. I fall av en full lastcykel per dygn skulle det överslagsmässigt dröja i storleksordningen 10 år för detta stål innan livslängden är helt slut. En lastcykel i veckan skulle innebära en livslängd över 50 år i ett sådant exempel. I praktiken används säkerhetsfaktorer både vid dimensionering och livslängdanalys varvid den angivna livslängden gentemot ett regelverk blir väsentligt reducerad jämfört med ett provningsresultat som ovan. Ramphastigheten har i praktiken liten betydelse för tryckutmattningsresultat eftersom spänningarna väsentligen är i det elastiska området. Tryckförändringar medför också temperaturförändringar. De behandlas för sig i avsnittet om termisk utmattningsanalys nedan. Om den mekaniska lastcyklingen sker i det plastiska området erhålls lågcykelutmattningsresultat eller termomekanisk utmattningsresultat. Då måste effekten av tryck och temperatur behandlas samtidigt. Det är främst turbinkomponenter som är utsatta för sådana laster. Komponenter hos pannor är i regel inte utsatta för plastiserande kontinuerlig cykling.

5.1.1 Kritiska komponenter

Det finns screeningverktyg för tryckutmattningsanalys som kan visa om en komponent är kritisk för tryckutmattningsanalys. Ett flertal sådana screeningberäkningar, genomförda av Inspecta Technology, har granskats. Resultaten pekar i normalfallet på att:

- i) Ångdomar (och vattendomar) är betydligt känsligare för tryckutmattningsanalys än fördelnings- och samlingslådor.
- ii) Screeninglivslängden är ofta i storleksordningen 500 cykler för fulla lastcykler hos ångdomar.
- iii) Screeninglivslängden hos lådor varierar. De har ofta en betryggande tryckutmattningslivslängd. Det finns dock fall med screeninglivslängder under 1000 cykler.
- iv) Screeningens resultat är mer eller mindre konservativt i förhållande till resultatet av en utmattningsanalys. En utmattningsanalys utförd enligt ett regelverk (vanligen enligt EN normerna) krävs för att visa utmattningslivslängden. Den beräknade livslängden inkluderar säkerhetsfaktorer vilket ska kompensera för okända faktorer som t.ex. anvisningar, avvikelser i materialegenskaper, materialdefekter samt eventuella osäkerheter i uppmätta laster och i beräkningsmetoder.

5.1.2 Hantering av risk för tryckutmattningsanalys

Från studerade driftdata från CFB-pannor framgår det att variationer mellan full effekt och 20-25 % av den fulla effekten endast innebär små tryckförändringar. Hos den studerade gaskombianläggningen medför avdrag från tillsatseldning en tryck- och temperaturminskning med ca 50 % respektive 75 %. Screeningberäkningar visar att tryckcykler med 50 % av full last ger ca 10 gånger längre livslängd än fullastcykler. I det här fallet finns det också en termisk last som behöver beaktas. Detta kräver en mer fördjupad analys, se avsnitt 5.2. För tryckutmattningsanalys utan eller med så långsamma temperaturramper att det inte uppstår termiska spänningar kan följande slutsatser dras:

- v) Tryckutmattningsanalys med fulla lastcykler blir sannolikt signifikant livslängdsbegränsande vid cykling på dygns- till veckobasis. Ångdomar är i regel mest kritiska.

- vi) Tryckutmattning är i normalfallet inte livslängdsbegränsande vid baslastdrift.
- vii) Tryckcykler med 50 % av full last ger ca 10 gånger längre livslängd än fullastcykler. Frekvent cykling, mer än en gång per dygn, skulle kunna medföra reducerad livslängd.

Med screeningverktyget kan det direkt utvärderas om risken för tryckutmattning är mycket kritisk, kritisk, måttligt kritisk eller inte kritisk. Graden av kriticitet avgör om och i så fall hur noggrann utmattningsanalys som behöver göras för att kunna beräkna livslängden och fastställa lämpliga provningsintervall.

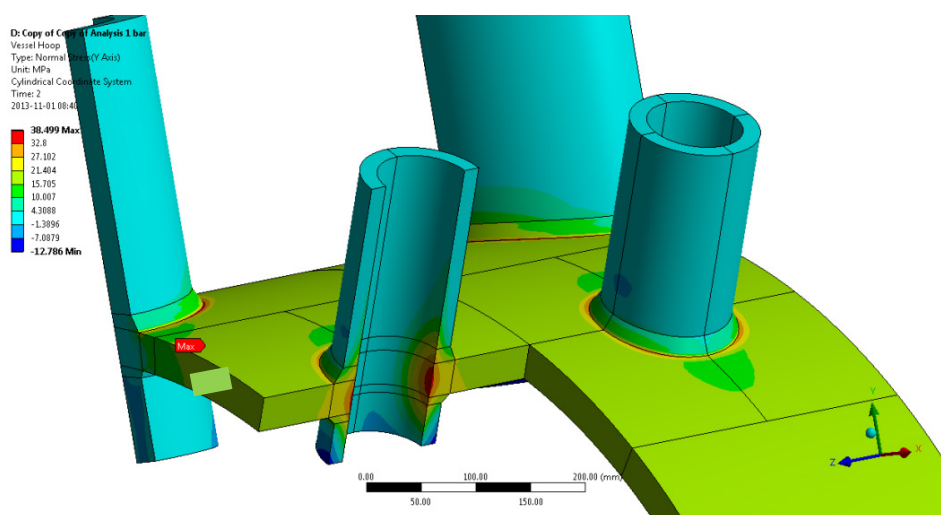
För tryckutmattning finns väletablerade tillväxtlagar och analysverktyg. Analys av tryckutmattning bör utföras i enlighet med EN 13445-3:2009.

Lasterna är tydligt definierade och genom finita elementmodeller av kritiska komponenter kan spänningsfördelningen beräknas med stor precision.

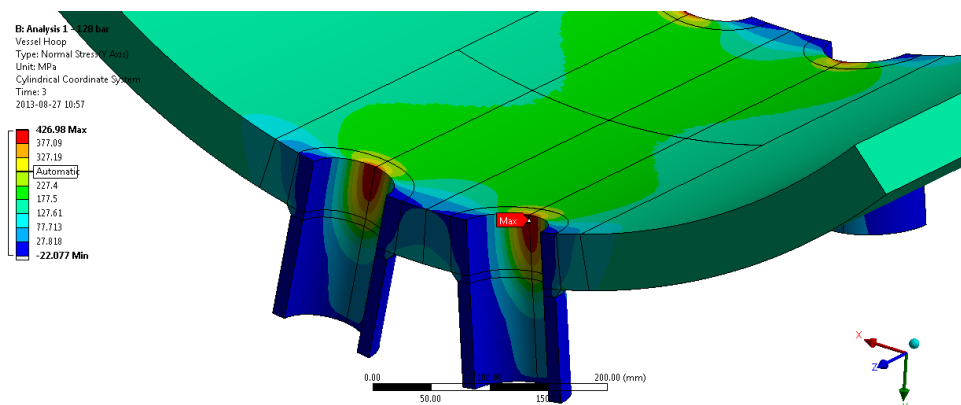
Vid utmattningsanalyser används säkerhetsfaktorer och oförstörande provning ska utföras vart 20 % av beräknad livslängd i antal belastningscykler.

Figur 7 a-b visar exempel på spänningsanalyser av två typer genomföringar hos ångdomar.

Sammanfattningsvis medför driftsätt med frekventa fulla lastcykler, dvs. kall- och varmstarter att livslängden med avseende på tryckutmattning mycket väl kan reduceras så mycket att det får praktisk betydelse hos ångdomar och i vissa fall även lådor.



a)



b)

Figur 7 Exempel på resultat av spänningsanalyser av genomföringar hos ångdomar med a) tuber genom manteln och med en tätsvets runt tuben på insidan and b) invalsade tuber [28].

5.2 TERMISK UTMATTNING

För att termiska spänningar ska uppstå på grund av flexibel drift krävs det att uppvärmningen är så snabb att godset inte hinner värmas upp lika snabbt i olika delar av en komponent, t.ex. tjockt gods intill tunt. Det gods som utvidgar sig snabbast tvingar då med sig det intilliggande tjockare godset. De töjningar som uppstår i det tjockare godset medför att spänningar uppstår så länge som temperaturen fortfarande är lägre än i det tunnare godset.

Termiska spänningar kan också uppstå hos komponenter som innehåller både vatten och ånga. Eftersom värmeöverföringen är betydligt snabbare i vatten än i ånga värms vattenberörda delar upp snabbare och utvidgar sig mer under uppvärmning.

Eftersom termiska utvidgning helt och hållet styrs av temperaturen blir förloppet töjningsstyrt. Om töjningen är så stor att plasticering sker blir de spänningsnivåer som då uppstår avhängigt materialets deformationsegenskaper för en given temperaturtransient.

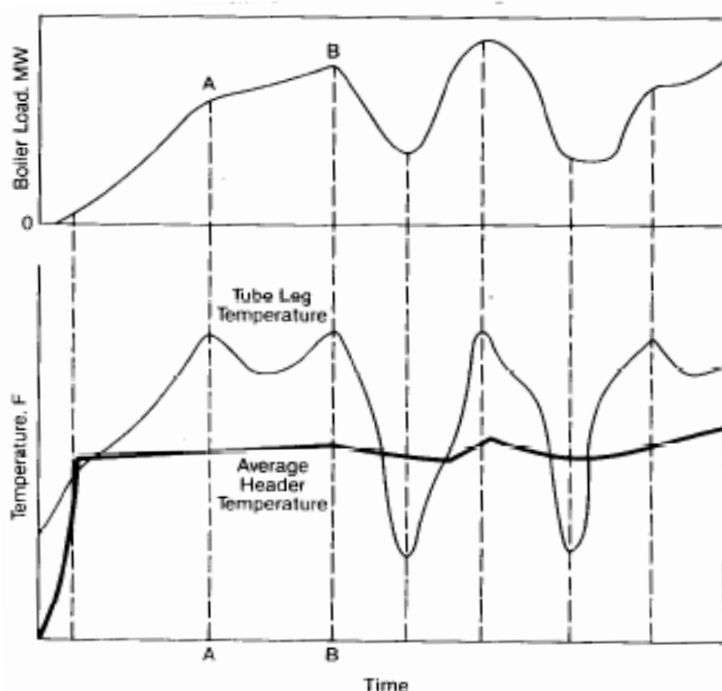
Temperaturcykelns omfång är naturligtvis avgörande för hur stora töjningar som kan uppstå. Rampningshastigheten är minst lika kritisk eftersom den måste vara tillräckligt snabb för att det ska uppstå termiska spänningar/töjningar. Vid start av en panna är det möjligt att det bara är en del av rampen som är kritisk med avseende på termiska spänningar. I litteraturen framgår det att panntillverkaren i regel specificerar maximala ramphastigheter i syfte att kritiska komponenter inte ska skadas.

5.2.1 Kritiska komponenter

Överhettarlådor är vanligen mest utsatta för termisk utmattning. Det förekommer även hos ekonomiserlådor. Om ångan eller vattnet som kommer in i lådan har en annan temperatur än den som redan finns där kan det uppstå termiska spänningar vid tubgenomföringarna, så kallade ligamentsprickor. Snabba transienter vid kall- och varmstart kan leda till termiska utmattningslaster. Det förekommer hos avgaspannor i gaskombianläggningar men kan antas vara ovanligt i samband med normala startförlopp (>12 timmar) hos en CFB panna. Kontroll av transienter i det enskilda fallet är ändå alltid god praxis och om delar startförloppet har relativt snabba transienter

rekommenderas även beräkningar i syfte att kontrollera risken för utmattning, se avsnitt 5.2.2.

Utöver snabba transienter vid starter eller snabbstopp är höga frekvenser av mindre temperaturvariationer en vanlig orsak till termisk utmattning. Värmedistributionen i pannan kan bli ojämn även under normal drift, t.ex. pga. påslag, stråkbildning samt ojämn bränsle- eller lufttillförsel. Även då allt fungerar optimalt tenderar det att bli varmast i mitten av pannan och lite kallare mot väggarna, vilket också visar sig på temperaturfördelningen längs ånglådorna. Totalt sett ger de olika förbränningsparametrarna en varierande värmetillförsel till överhettarna. Olika individuella överhettarslingor kan ha olika ångflöde beroende på t.ex. ovan nämnda faktorer. Det ger olika temperaturer i olika tuber in i ånglådan. I ånglådan blandas ångan från olika tuber och temperaturerna utjämnas. Skillnader på 40°C i ångtemperatur mellan tub och låda är inte ovanligt, även för normal drift med baslast [1]. Detta medför termiska spänningar när tubens individuella temperatur möter den utjämnade temperaturen i lådan. Liknande effekter kan förväntas om bränsletillförseln varierar pga. primär eller sekundärreglering. Analyser av ligamentsprickor i överhettarlådor och ekonomiserlådor i kraftvärmeverk pekar på kan det räcka med $\Delta T = 30^\circ\text{C}$ för att sprickorna ska kunna uppstå. Figur 8 visar schematiskt kopplingen mellan variationer i last och temperatur hos överhettartub och låda. Även motsvarande variationer tubernas längdutvidgning kan medföra utmattningslaster vid infästningarna i låda och i tak/vägg.



Figur 8 Koppling mellan variation i last och ångtemperatur hos tub intill låda samt medeltemperatur i lådan [29].

Hos svenska CFB pannor är det sannolikt få om ens några ånglådor som är dimensionerade mot utmattning. Vanligtvis är inte heller avgaspannor i

gaskombianläggningar det. En grundregel är att ha så liten skillnad som möjligt i godstjocklek mellan tub och mantel. Därför är det klokt att välja ett material med hög hållfasthet så att mantelns godstjocklek minimeras. En konstruktionslösning har tillämpats hos gaskombianläggningar och som minskar termiska spänningar är att tuberna går in en eller flera lådor med mindre diameter, och därmed också mindre godstjocklek än den slutliga samlingslådan. Sedan ansluter mellanstegslådan till samlingslådan med studsanslutningar med större diameter (och tjockare gods) än tuberna för att minska skillnaden i godstjocklek mellan anslutning och låda.

Pannor utrustade med mellanöverhettning är gynnade om effekterna av lastväxling tas upp där. Eftersom mellanöverhettningen har reducerat tryck är godstjockleken hos samlingslådan oftast betydligt mindre än hos motsvarande högtryckslåda, vilket medför lägre termiska spänningar.

Vid flexibel drift är det mycket viktigt att se över dräneringar m.m. så att inte kondensat kommer in i ånglådor. Det kan medföra att de kröker sig vid start om vatten finns kvar. Anslutande tuber och rör kan då också få allvarliga skador. Kondensat i ånglådor kan alltså medföra betydande skador på bara en enda start.

Eftersom ångdomar är fyllda till ca hälften med vatten finns det risk för att även sådana kan kröka sig och också ge skador hos anslutande rör och tuber om uppvärmningen är för snabb.

5.2.2 Hantering av risk för termisk utmattning

Risken för termisk utmattning i samband med termiska transienter hos överhettar- och ekonomiserlådor är alltså beroende av temperaturomfång, ramphastighet, design och materialval. Vid införande av flexibel drift kan följande utredningar rekommenderas i syfte att ha kontroll över om den flexibla driften kommer att medföra reducerad livslängd med avseende på termisk utmattning:

- Kontroll av ramper vid kall- och varmstart. Finns det delar av rampen med snabbare temperaturstegring än 5°C/minut finns det, baserat på tidigare beräkningsfall utförda av Inspecta Technology, risk för reducerad livslängd genom termisk utmattning. En utmattningsanalys kan rekommenderas vid temperaturstegringar på 5°C/minut eller snabbare.
- I fall av laständringar i drift: utrusta samlingslådor hos överhettarna med termoelement vid ett urval tuber nära inloppet och logga temperaturen. Med ett sådant underlag kan en tillförlitlig utmattningsanalys genomföras. Det skulle vara intressant att köra några typlastcykler i en panna med installerade termoelement. Producerade data skulle då även kunna användas till ungefärliga utmattningsberäkningar hos liknande pannor.
- Kontrollera att kondensat inte finns kvar i överhettarlådor i samband med starter. Det skulle ge mycket höga termiska spänningar eftersom värmeöverföringen skiljer sig mycket mellan vatten och ånga.
- Om analys av flexibel drift av pannan pekar på begränsad livslängd upprättas ett kontrollprogram som anpassat till resultaten. Ligamentsprickor är i vissa fall möjliga att hitta med ultraljud utifrån. Andra möjligheter och med avtagande känslighet är digital röntgen samt videoskop genom inspektionsstuts.

Ser man till den genomsnittliga temperaturökningen hos typfallen av cyklisk drift i tabell 1 är det endast hos primärregleringen som rampringshastigheten är större än 5°C/minut. Temperaturvariationen är endast 30°C så det krävs ett mycket stort antal

cykler för att utmattningssprickor ska bildas. Å andra sidan medför primärregelring med tiden också ett mycket stort antal cykler. Övriga typfall har relativt långsamma rampningshastigheter i genomsnitt men det går ofta betydligt snabbare inom en del av temperaturintervallet. Det är alltså viktigt att kontrollera eventuellt intervall med förhöjd ramphastighet.

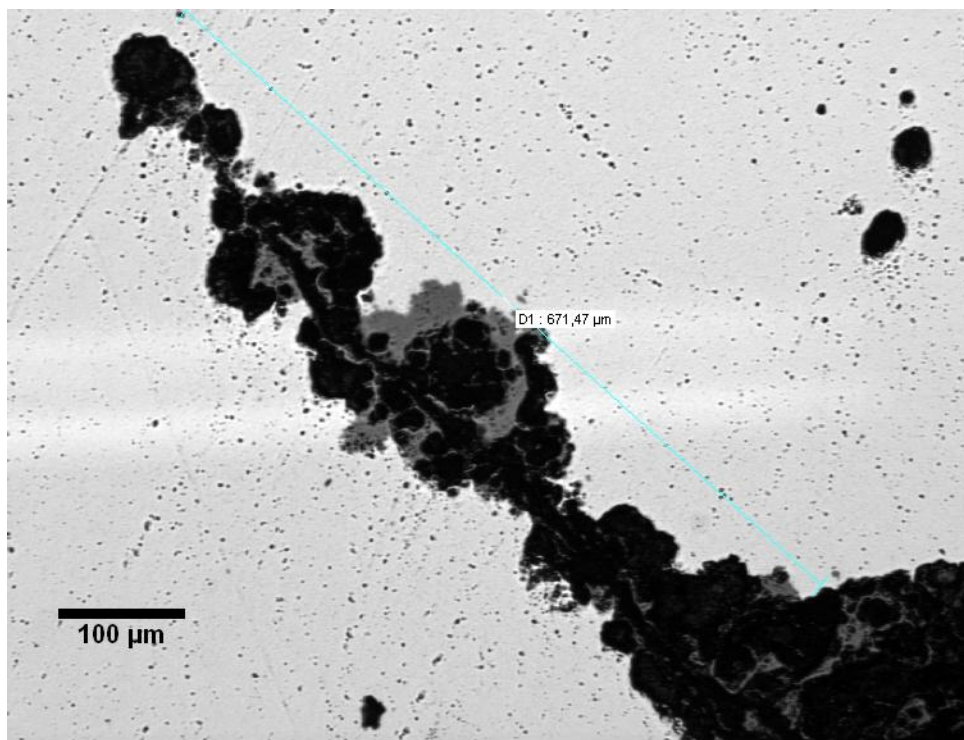
5.3 TÖJNINGSENDUCERAD KORROSIONSPRICKNING

Miljöinducerad sprickbildning förknippas vanligen med spänningsskorrosions-sprickning (SCC) och korrosionsutmattning (CF), där en kombination av korrosiv miljö och statisk respektive cyklisk spänning leder till sprickbildning. Hos ferritiska stål i vattenmiljö finns en ytterligare variant; töjningsinducerad korrosionssprickning (Strain Induced Corrosion Cracking, SICC). För SICC finns inte etablerade metoder för analys som för t.ex. utmattning.

Trots detta är SICC, åtminstone här i landet, den vanligaste typen av miljöinducerad sprickbildning på vattensidan hos ångpannor. Det är töjningar som leder till att magnetitskikt spricker och som utgör en förutsättningen för att sprickor också ska bildas i stålet [3]. Magnetitens töjningsförmåga är starkt begränsad i jämförelse med stålet. Brottöjningen är endast ca 0,1 och 0,2 % i drag respektive kompression [28]. Det medför att magnetiten spricker om materialtöjningen pga. termiska spänningar och/eller spänningar pga. inre övertryck blir tillräckligt höga. En annan förutsättning är att vattnet vid tillfället innehåller en viss halt syre så att det kan bildas ett litet korrosionsangrepp efter att magnetiteten har spruckit, i annat fall läker oxidskiktet ihop igen.

Eftersom magnetiten i regel bildas i samband med att pannan tas i drift är det vid svaltning i samband med ett stopp som magnetiten spricker pga. termisk kontraktion. När systemet är trycklöst kommer det lätt in luft och vattnet får en tillräckligt hög syrehalt för att ett korrosionsangrepp ska ske. Under själva stoppet är korrosionshastigheten mycket låg men under startförloppet ökar korrosionsaktiviteten väsentligt det sker en spricktillväxt pga. växelverkan mellan korrosion och mekanisk spricköppning, 30 ppb syre anses vara tillräckligt. Det har visats [3] att spricktillväxthastigheten är beroende av spänningsintensiteten vid sprickan för aktuell komponentgeometri och på töjningshastigheten. Långsamma startförlopp anses generellt vara skonsamt för pannan och inte minst för turbinen med avseende på termisk utmattning. Det ger dock också låga töjningshastigheter, vilket i sin tur medför en något förhöjd spricktillväxt per cykel med avseende på SICC [28].

I samband med att fullt drifttryck uppnås sjunker syrehalten i vattnet normalt till nivåer som inte medför fortsatt korrosion. Under drift sker ingen spricktillväxt. Vid nästa stopp spricker magnetiten igen i botten i den spricka som har bildats. Under stopperperioden kan det korrodera i botten av sprickan så att den blir trubbigare utan egentlig tillväxt i djupled förrän nästa start. Figur 9 visar ett exempel på ett metallografiskt preparerat tvärsnitt av en typisk spricka som har bildats genom SICC. Man kan se hur sprickan omväxlande har vuxit och korroderat i sprickbotten för att bilda det karaktäristiska utseendet för SICC.



Figur 9 Metallografiskt preparerat tvärsnitt av en karaktäristisk SICC som har propagerat från vattensidan av en vägg [28].

Ovanstående beskrivning pekar på att det endast är driftfallet kallstart i tabell 1 som kan aktivera SICC. Flexibel drift som omfattar kallstarter kan alltså medföra väsentligt reducerad livslängd hos vattenberörda komponenter.

5.3.1 Kritiska komponenter

Geometrier som ger spänningskoncentrationer på vattensidan är generellt sett kritiska. I anläggningar med god vattenkemi, dvs. det finns ett gott korrosionsskydd i form av ett heltäckande och tätt magnetitskikt på vattensidan i pannan, är det bara spänningsnivåer som medför att magnetiten spricker som är kritiska för sprickbildning. Är magnetitskiktet inte i acceptabelt skick kan SICC uppstå vid betydligt lägre spänningsnivåer.

Ångdomar

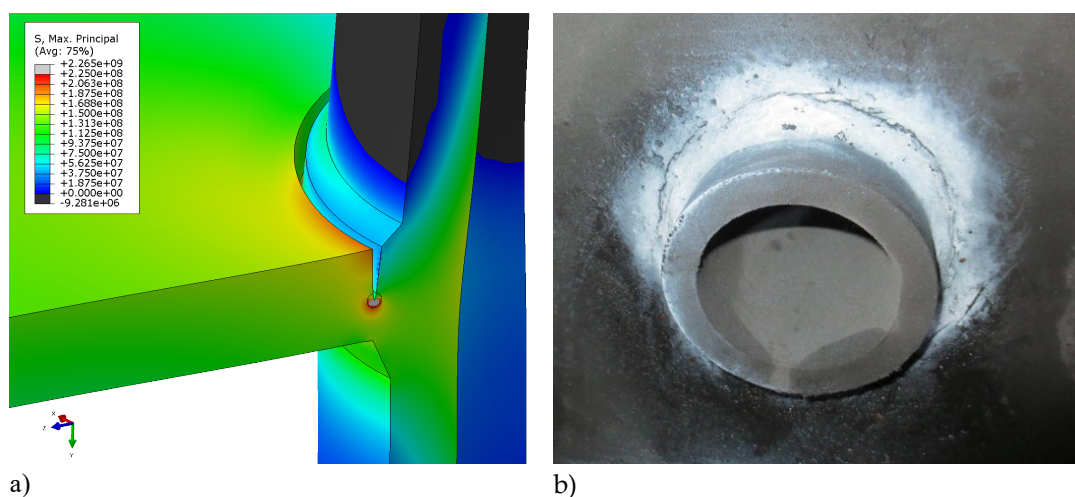
SICC är vanligt förekommande i ångdomar och även i vattendomar hos pannor som är utrustade med sådana. De som är tillverkade av höghållfasta stål har högst skadefrekvens. Det beror på att den höga hållfastheten i regel utnyttjas medförande så höga spänningar att magnetiten spricker. Ångdomar med undermåligt magnetitskikt är sprickbenägna även om de är tillverkade av stål med lägre hållfasthet eftersom magnetit inter behöver spricka föra att SICC ska bildas. Oskyddat stål finns redan tillgängligt.

Det är också vanligt förekommande att ångdomar tillverkade av höghållfasta stål inte har sprickproblem. Det beror sannolikt på att man lyckas hålla nere syrenivån i vattnet under kritisk nivå (30 ppb) under stopp och start av pannan. Eftersom SICC är så

vanligt förekommande borde det finnas potential för fler anläggningar att komma till rätta med skadeproblemen. För flexibel drift som omfattar kallstarter är det viktigt att försöka eliminera risken för SICC. Signifikant ökning av antalet cykler skulle ge högst väsentliga livslängdsreduktioner om SICC aktiveras.

Figur 10 visar SICC runt ett fallrör i en ångdom och modellering av sprickan som genomfördes i [28]. Hittar man sprickor behöver man göra en skadetålighetsanalys för att avgöra hur djupa sprickor och hur djupa urslipningar av sprickor som kan accepteras. Metoder för att analysera SICC och ta fram en tillväxtlag för SICC har utvecklats inom Energiforsk. Ångdomar är i vissa fall mycket högt utnyttjade och sprickdjup på endast några mm kan då vara oacceptabla.

Utbyte av en ångdom är mycket kostsamt och metoder för minska risken för SICC behöver vidareutvecklas i syfte att säkerställa acceptabla livslängder vid flexibel drift. Ett fullgott korrosionsskydd i form av ett tätt och vidhäftande magnetiskt skikt är i alla fall nödvändigt.



Figur 10 Spricka i mantel intill svets mellan mantel och genomföring i a) modell och b) verklighet [28].

Väggglådor

SICC är inte lika vanligt förekommande i väggglådor som hos ångdomar. Det beror på att spänningarna i regel inte blir lika höga vid lådors genomföringar som hos domar. Därför är det framför allt lådor i anläggningar med undermåligt korrosionsskydd som drabbas.

Tuber

Tubläckor i eldstaden pga. SICC förekommer i områden med förhöjda spänningar, inte minst i konstruktionslösningar med inspända tuber, t.ex.:

- Längs neutrallinjer hos böjar
- Vid fenavslut
- Tuber med fler än två fenor
- Stag, plåtar etc. svetsade mot tub
- Insvetsning av golv och tak mot sidovägg

- Avledningstuber

Tuber är relativt tunna och man kan förvänta spricktillväxter per kallstart som är i paritet med ångdomar [28]. Flexibel drift kan därmed öka frekvensen tubläckor. En tubläcka kan i regel repareras relativt snabbt men mer frekventa tubläckor eller tubfläkningar är ändå knappast önskvärt. I värsta fall finns det svetsar längs tub på utsidan som i fall av tubfläkning medför mycket allvarliga konsekvenser i form av pannhuset snabbt blir ångfyllt och livsfara för personer i huset.

Om flexibel drift som omfattar ökad frekvens av kallstarter rekommenderas en genomgång av panna i syfte att identifiera alla positioner där SICC har potential att bildas. Insidiga sprickor är problematiska att upptäcka med oförstörande provning. Uttag av tubprover för metallografisk undersökning eller digital röntgen (DRT), om det går att komma åt, är de metoder som står till buds.

5.3.2 Hantering av risk för SICC

Ett första steg för att ha kontroll över eventuell sprickbildning genom SICC är oförstörade provning (OFP) av domar och lådor samt tubprover från konstruktionslösningar med risk för SICC för att kartlägga nuvarande status. Finns det redan sprickproblem är det väsentligt att genomföra åtgärder i syfte att eliminera att luft kommer in i systemet i samband med stopperperioder. Etablering av en kvävekudde under stopperperioder är en åtgärd som praktiseras av en del anläggningsägare. En beskrivning av det praktiska genomförandet och erfarenheter känns angeläget.

Oavsett om det finns sprickproblem eller inte rekommenderas en skadetålighetsanalys av ångdomen samt en utvärdering av eventuell spricktillväxt. Resultaten ger underlag till att bestämma relevanta intervall för OFP.

6 Möjligheter till dynamikrespons vid flexibel drift

6.1 GRUNDPRINCIPER KRAFTVÄRME

För kraftvärme kan man se två olika grundfilosofier:

- Mottryck där all ånga efter expansion i ångturbinen används till värmeproduktion, dvs. som hos de flesta anläggningar i Sverige.
- Kondensturbin med fjärrvärmeavtappning där en delmängd av ångan tas ut ur ångturbinen vid lämpligt tryck för fjärrvärmeproduktion i en separat kondensor och resten av ångan expanderar vidare till en kall huvudkondensor.

En anläggning byggd med mottryck kan normalt bara köras upp till den last som man kan bli kvitt genom behov i fjärrvärmenätet, i Sverige har det inte varit något större problem eftersom stort värmebehov sammanfaller med stort elbehov. Denna anläggning körs alltid för att hålla max totalverkningsgrad, el blir en biprodukt.

En kondensturbinanläggning kan däremot alltid köras på full last och får hög genomsnittlig elverkningsgrad och förhoppningsvis god ekonomi genom högt utnyttjande eftersom man slipper följa sitt värmeunderlag. Här är el huvudprodukt och fjärrvärmen en biprodukt. Tyvärr kan en sådan anläggning inte helt stoppa drift av huvudkondensorn eftersom ångturbinens slutsteg kräver ett kylångflöde. Om man försöker gå ner i last för att följa sin värmelast kommer man att vara tvungen att föra minst ca 15 % av värmets i kallkondensorn. Expansionen nedströms fjärrvärmeavtappningen ger i då princip ingen produktion. Denna kraftvärmepincip ger rätt dålig lönsamhet i Svenska förhållanden med dagens energipriser. Den bygger på lönsamhet för kondenskraft i baslast.

För de snabbaste responserna räcker knappt ens batterisystem eller smarta regleringar av vindkraft utan man pratar främst om utnyttjande av tröghetsmoment i roterande synkronmaskiner. Det pågår utveckling av kombianläggningar där man adderar svänghjul till gas- eller ångturbinens rotor samt överdimensionerar generatorm jämfört med den drivande maskinens kapacitet. Befintliga kraftverk har redan en inbyggd förmåga för detta (hur stor beror av tillgänglig effektreserv i generator vid aktuell utmatad effekt) men det beror på om man passivt följer nätet med traditionell statik eller tillämpar en mer aktiv styrning. Modifieringar av styrmetoder för att förbättrad respons är relativt billigt.

Ångsystem har en stor ackumulering av energi i pannans termiska tröghet. Det kan utnyttjas i en del applikationer för att öka dynamikrespons för ångturbinen. Om man kör fasttryck kan man låta trycket variera något om man tillåter ångturbinens pådragsventil att även spela mot elresponsbehov inom ett visst spann. En ångturbin ger respons på bråkdelar av sekund. Kapaciteten beror på hur stor språnggradient i last ångturbinen kan acceptera respektive tillåten tryckgradient och språnggradient i pannan. Hur stort språng man kan ta beror även på hur återhämtning efter språnget ser ut, vid effektökning måste pannan rampa upp och "köra ifatt" det man plockat ur i form av ackumulerad värme. Även anläggningar som går i glidtrycksreglering kan ges en smula fasttryck genom att man lägger in en liten strypning i ångturbinens pådrag lagom anpassad till dynamikbehovet.

Kraftvärmeanläggningar kan utnyttja värmetrögheten i fjärrvärmenätet och kortvarigt, upp till antal timmar, över- eller underproducera värme för att därigenom något anpassa last till elnätets behov. Har man dessutom en fjärrvärmeackumulator klarar man upp till dygnskala i miss-match.

Kraftvärme kan även delvis köras som kondenskraft, även befintliga anläggningar kan modifieras för detta. Då kan man fritt köra fullast för elproduktion även vid låg värmelast.

6.2 HYBRIDLÖSNINGAR

“Kondenssvans” innebär att en separat lågtrycksturbin kopplas in vid behov. Det är en relativt dyr lösning. Den tar viss tid att starta upp och väl uppstartad har man minimum lastkrav. Metoden medför vissa tekniska utmaningar med regelbunden konservering av stor kallkondensor, stilleståndskorrosion, kemiproblem vid återstart, frysproblem mm. Motiverbart endast om en stor del av driftsäsong är i fullkondens.

“Sommarkylare” innebär kylning av fjärrvärmevatten mot omgivningsluft eller öppet kylvatten. Det skapar ökat värmeunderlag i fjärrvärmenätet och ger alltså kapacitetsmässigt nästan samma verkan som en kondenssvans. Det ger något sämre elverkningsgrad vid fullkondensfallet än en kondenssvans men detta spelar mindre roll om drifttiden i denna driftmod är begränsad. Det är produktionskapacitet man vill åt och en skillnad i verkningsgrad på fåtal procent har då marginell betydelse.

Sommarkylarens stora fördel är att den är extremt snabbstartad och reglerbar, begränsningen ligger bara i hur snabbt man kan lasta på pannan. Vid sommarkylare som kyla av omgivningsluft står den normalt dränerad under vintertid men kan snabbstartas ändå. Sommarkylare kan även anslutas mot fjärrvärmenätet någon annanstans än direkt vid kraftvärmeverket. Vid komplettering av ett befintligt verk är det en stor fördel eftersom markytan annars kan vara begränsande. Det även är möjligt att sätta kylare på taket av en byggnad. Det kräver dock att byggstommen kan ta ökad last. En fördel med den placeringen är lindrigare ljudkrav än vad man ofta får på mark, det är även lättare att få bra luftomsättning.

Både kondenssvans och sommarkylare skulle dock kunna användas för att frigöra elproduktionen från värmekonsumtionen i fjärrvärmenät.

Förslag på konkreta möjligheter till dynamikrespons:

- Skapa reglerförmåga för att stötta primärregling vid glidtrycksstyrd anläggning genom tillägg av lagom avvägt tillägg i tryck utöver det naturliga glidtrycket. Sådant tillägg regleras av en trög regulator vilket innebär att anläggningen får det snabba dynamiksvaret av fasttrycksreglering tills glidtrycket nåtts. Efter dynamikuttaget återhämtar den tröga regulatorn trycktillägget för att göra anläggningen beredd för nästa lastförändring. Storleken av trycktillägg ges som ett börvärde utifrån önskad dynamikförmåga i driftsituationen i fråga, t.ex. utifrån erfarenhet eller prognoser.
- Skapa snabbare lastrampling genom manipulation av turbinreglering. En traditionell pannanläggning som är fasttrycksreglerad har ofta ångtrycket reglerat av ångturbinen och last varierar genom ändring i bränslematning med alla de tidskonstanter genom systemen som det innebär innan en ändring ger utslag i ändrad eleffekt. En alternativ reglermetod är att köra ångturbinen i effektereglering och hålla ångtrycket genom bränslematningen. Då fås en kraftfull effektereglering men

också risk för relativt stora trycksvängningar som kan resultera i instabilitet eller kraftigare svängningar än vad pannan kan tolerera.

- Man kan åstadkomma ett mellanting mellan dessa reglermetoder genom att vid lastökning lura turbinregulator att momentant dra på något samtidigt som bränslematningen ökar t.ex. genom en styrning som tillfälligt drar ner tryckbörvärde för att sedan långsamt rampa upp det till normalvärde igen. Reduktionen av tryckbörvärde innebär att turbinen "drar" ur ett större ångflöde ur pannan vilket dels ger momentan effekttökning och dels hjälper pannan att bättre tåla upprampning av bränsleflöde eftersom flödet genom överhettarna ökas före eller samtidigt med ökad värmelast. Även cirkulation i panntuber stimuleras troligen genom tillfälligt ökad ångblåsbildning. Sådan dynamikförhöjning bör provas ut i mindre steg med mätning och utvärdering av materialtemperaturer mm. Hur detta kombineras med frekvensavvikelseerspons via statik bör studeras. Val av uttag av dynamik via statiken eller mer aktiv reglering kan vara en strategifråga kopplad till hur laständringar säljs.
- Manuellt beredskapsläge genom lastökning av pannan och dumpning av resulterande ökning av ångflöde till turbin-bypass, för att sedan snabbt kunna trycka ut en lastökning från turbinen (utan lastökning av pannan) genom att stoppa bypass, och expandera via ångturbinen istället. Metoden kan användas när en situation med stor risk för nätstörning befaras eller kan förutses, till exempel vid kommande solförmörkelse och stor solandel, snabbt och förutsett tapp i vindstyrka över en vindkraftpark eller ett snabbstopp av annat större kraftverk där viss förvarning kan ges. Metoden är redan fullt möjlig på de flesta existerande anläggningar men användning kräver förutseende och snabb kommunikation samt finansiell kompensation mellan "störare" och "kompenserare". Kommunikation via pris på kraftbörs är inte proaktiv på det sätt som krävs och det är även tveksamt om kraftbörsen kompenserar kostnaderna tillräckligt.

7 Fortsatta studier

Föreliggande förstudie visar på att automatisk primär- och sekundärreglering av variationer i vindkraftsproduktionen med hjälp av kraftvärmeverk har utvecklats och verkar fungera tillfredställande i Danmark. Det är i huvudsak större genomströmningspannor som används till regleringen. Regleringsbehovet är störst i västra Danmark som inte är anslutet till det nordiska elnätet och därmed inte kan primär- och sekundärregleras med norsk och svensk vattenkraft. Reglering sker även på dygnsbasis eftersom de danska kraftvärmeverken endast är lönsamma när elpriserna är höga under morgon och kväll.

I fall av reglering med hjälp av kraftvärme i Sverige har det antagits att det i första hand skulle vara bioeldade CFB-pannor som skulle stå för regleringen. Är de utrustade med en ackumulator skulle de i princip kunna leverera liknande reglering som de danska anläggningarna. Fortsatta studier behövs för att utveckla tekniska lösningar för regleringen som passar svenska förhållanden. Tre möjliga behov av reglering har kunnat identifieras:

- Primär- och sekundärreglering för ökande intäkter och för att kompensera för minskad tröghet framtida elsystem. I vilket skede reglerbehovet blir så stort att det blir gynnsamt för kraftvärmeverken att ta del i detta är inte klarlagt och behöver utredas närmare.
- Reglering på dygnsbasis (varmstarter) kan bli ett behov i Sverige på sikt om andelen förnybar energi ökar väsentligt. Det finns studier som visar att varmstarter har begränsad inverkan på livslängden hos kritiska komponenter. Samtidigt finns det relativt omfattande litteratur är skadeproblem pga. termisk utmattning, särskilt från Storbritannien där man har lång erfarenhet av "two-shift operation" [30]. En fördjupad studie som i mer detalj klarlägger risker med och eventuella restriktioner för motsvarande driftsätt under svenska förhållanden kan rekommenderas. Reglermöjligheter för minska gradienter bör också beaktas.
- Kallstarter av spetslastanläggningar finns det behov av redan idag om än i begränsad omfattning. En ökad frekvens kallstarter medför sannolikt att reducerad livslängd pga. SICC ökar väsentligt. Ökad förståelse för denna skademekanism är nödvändig för att kunna hantera detta på ett tillfredsställande sätt. Metoder för att hålla syrehalten i pannvattnet tillräckligt låg under stopperioder behöver vidareutvecklas.
- Vattenkraften samsas kring reglering, och kraftvärme borde kunna göra lika. Styrfilosofi hur anläggningar kan samsas kring reglering och dynamik behöver utvecklas.
- Utveckla metodik för anläggningsägare som kan användas för att karakterisera anläggningar; kvantifiera och identifiera fenomen och begränsningar i anläggningen. Exempelvis vad kan göras med anläggningen och vad innebär ett visst körsätt för slitage på anläggningens komponenter.
- Fallstudie för specifik anläggning, vad innebär ändrat körsätt för laster och slitage.
- Metod för att värdera och resonera, inklusive ekonomisk analys, kring snabbare reglering av kraftvärme, exempelvis vad är mest ekonomiskt, att varmhålla pannor eller starta väldigt snabbt, dvs. väga risk/möjlighet till högt elpris kontra varmhållning av pannor – vad kostar respektive strategi.

Föreliggande studie har begränsats till pannor och i första hand CFB-pannor. Även turbinanläggningar [30] och ångledningar [31] kan påverkas av flexibel drift. Ett uppföljande projekt som även behandlar dessa anläggningsdelar kan rekommenderas.

Möjligheterna till dynamikrespons i samband med flexibel drift har beskrivits kort i föreliggande förstudie.

8 Slutsatser

En förstudie av möjligheter och begränsningar med flexibel drift av kraftvärmeverk har genomförts. Följande slutsatser kan dras:

- En ökad frekvens kallstarter (vecko-reglering) i främst kan ge reducerade livslängd hos ångdomar genom töjningsinducerad korrosionssprickning. Fördjupade studier av denna skademekanism och metoder för att reducera dess effekter är viktiga. Även tryckutmattning kan bli kritiskt hos ångdomar. Idag finns det etablerade metoder för att analysera tryckutmattning så att restlivslängd och lämpliga inspektionsintervall kan bestämmas
- Varmstarter är kritiska i fall av snabba startramper. Det drabbar främst samlingslådor till överhettare och det finns litteratur på området. En noggrannare utredning av behov av startramper och i vilken utsträckning de kan reducera livslängden vid flexibel drift under svenska förhållanden vore önskvärt.
- Primär- och sekundärreglering kan relateras till relativt små tryck- och temperaturvariationer. Samlingslådor till överhettare kan ändå få en reducerad livslängd men sannolikt först efter många års drift.
- Istället för att lastvariationer ska medföra allt för stora temperatur- och tryckförändringar kan olika former dynamisk respons utnyttjas. En fördjupas studie av möjligheter och begränsningar rekommenderas.

9 Referenser

- [1] Storesund J, 2007. Cyklisk drift av kraftvärmeverk, Värmeforskrapport 1025, Stockholm, december 2007.
- [2] Storesund J, 2011. Förebyggande underhåll och livslängdsbedömning med avseende på cyklisk drift, Värmeforskrapport 1178, Stockholm, mars 2011.
- [3] Sköldberg H, Unger T, Holmström D, 2015. El och fjärrvärme - samverkan mellan marknaderna, Energiforsk rapport 2015:223.
- [4] Karlsson D, Lindahl S, 2015. IVA – Vägval el – "Svängmassa" i elsystemet, Gothia Energi Dokument U-DKa-15-006-01C.
- [5] Söder L, 2014. På väg mot en elförsörjning baserad på enbart förnybar el i Sverige, En studie om behov av reglerkraft och Överföringskapacitet, Version 4.0, Elektriska energisystem, KTH, 2014-06-22.
- [6] Söder L, Larsson S, Dahlbäck N, Linnarsson J, 2014. Reglering av ett framtida svenskt kraftsystem, NEPP rapport november 2014.
- [7] Eng M, Johansson B, Dahlström P, 2015. Undersökning av möjligheter för svenska kraftvärmeverk att leverera primär frekvensreglering, FCR-N. Värmeforskrapport 1261, Stockholm, december 2014.
- [8] Svenska kraftnät, 2005. SvKFS 2005:2 - Affärsverket svenska kraftnäts föreskrifter och allmänna råd om driftsäkerhetsteknisk utformning av produktionsanläggningar. (Elektroniskt).
http://www.svk.se/Global/07_Tekniska_krav/Pdf/Foreskrifter/SvKFS2005_2.pdf
- [9] Svenska kraftnät, 2012. Regler för upphandling och rapportering av primärreglering FCR-N och FCR-D. (Elektroniskt).
http://www.svk.se/Global/02_Press_Info/Pdf/Faktablad/Upphandling-och-rapportering-av-primarreglering-fran-16-nov-2012-20140120.pdf
- [10] Persic S, 2007. Frekvensreglering i det nordiska kraftsystemet – Modellering i PSS/E – KTH Elektro- och systemteknik, XR-EE-ES 2007:008.
- [11] Anpassning av elsystemet med en stor mängd förnybar elproduktion -En delredovisning från Svenska kraftnät, 2015/929.
- [12] Svenska kraftnät, 2013. Perspektivplan 2025 – en utvecklingsplan för det svenska stamnätet. (Elektroniskt). http://www.svk.se/Global/02_Press_Info/Pdf/20130429-Perspektivplan2025.pdf
- [13] Lund H, Werner S, Wilthire R, Svendsen S, Thorsen J E, Hvelplund F, Mathiesen B.V, 2014. 4th Generation District Heating (4GDH), Integrating smart thermal grids into future energy systems. *Energy*, 68, 1-11.
- [14] Rinne S, Syri S, 2015. The possibilities of combined heat and power production balancing large amounts of wind power in Finland, *Energy* 82, issue C, pages 1034-1046.
- [15] Lund PD, Lindgren J, Mikkola J, Salpakari J, 2015. Review of energy system flexibility measures to enable high levels of variable renewable electricity. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 43, 785-807.
- [16] Åberg M, Widén J, Henning D, 2012. Sensitivity of district heating system operation to heat demand reductions and electricity price variations: A Swedish example. *Energy*, 41 525-54, 41 525-540.

- [17] Sorknaes P, Lund H, Andersen A.N, 2015. Future power market and sustainable energy solutions - The treatment of uncertainties in the daily operation of combined heat and power plants. *Applied Energy*, 144, 129-138.
- [18] Nuytten B, Claessens B, Paredis K, van Bael J, Six D, 2013. Flexibility of a combined heat and power system with thermal energy storage for district heating. *Applied Energy*, 104, 583-591.
- [19] Ommen T, Markussen W.B, Elmegaard B, 2014. Heat pumps in combined heat and power systems. *Energy*, 76, 989-1000.
- [20] Sharman S, Meyer H, 2009. Wind Energy – the case of Denmark, Center for Politiske Studier, September 2009.
- [21] Christensen T, 2014. Operational flexibility of Danish CHP-plants, VGB Keli Conference. Landshut 5-8 May 2014.
- [22] Basit A, et al, 2014. Proceedings of China Wind Power conference (CWP 2014), 22-24 October, Beijing.
- [23] Sharman H, Why wind power works for Denmark, 2005. Proceedings of ICE Civil Engineering 158, paper 13663, pages 66-72.
- [24] Hjalmar Hasselbalch, Personlig kontakt 2016.
- [25] Münster M, Morthorst P.E, Larsen H.V, Bregnbæk L, Werling J, Lindboe H.H, Ravn H. 2012, The role of district heating in the future Danish energy system. *Energy*, 48, 47-55.
- [26] Gottel F, et.al, 2009. Auswirkungen von fluktuierender Windenergieinspeisung auf das regel- und thermodynamische Betriebsverhalten konventioneller Kraftwerke in Deutschland – Bestandsaufnahme und Ableitung zukünftiger Anforderungen, Universität Rostock, VGB PowerTech, Rostock 21 Oktober.
- [27] Bulatovic S, et al, 2014. Identification of low cycle fatigue parameters of high strength low alloy (HSLA) steel at room temperature, *Metalurgija* 53 (2014) 4, 466-468.
- [28] Storesund J, Inverkan av cyklisk drift – SICC, 2016. Energiforsk rapport för publikation.
- [29] Nakoneczny G, Schultz C, 1995. Life assessment of high temperature headers. American Power Conference, April 18-20, Chicago, Illinois, USA.
- [30] Ford J, Fernandes J, Shibli A, 2009. Damage to power plant due to cyclic operation and guidelines for best practices, ETD report 1096-gsp-81.

FLEXIBEL DRIFT AV KRAFTVÄRMEVERK

Här beskrivs möjligheter och begränsningar med flexibel drift av kraftvärmeverk. I framtiden kommer behovet att kunna reglera elproduktionen att öka och kraftvärmeverken skulle kunna bidra till den regleringen.

Primär- och sekundärreglering ger endast mindre lastvariationer i kraftvärmeverkens pannor, och medför därmed inga större konsekvenser för pannan. Resultaten visar däremot att dygnsreglering, som innebär större laständring i pannan genom kall- och varmstarter, leder till förslitningar och minskad livslängd för kritiska komponenter. De komponenter som är mest utsatta är ångdomar, fördelnings- och samlingslådor och ventiler.

Förstudien föreslår ett flertal fördjupade studier, exempelvis av startramper och i vilken utsträckning de kan reducera livslängden vid flexibel drift för svenska förhållanden. Olika former av dynamisk respons kan också utnyttjas för flexibel drift vilket skulle behöva studeras närmare.

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