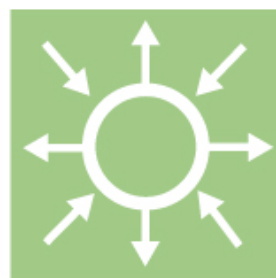


# Metodik för riskbaserad verifiering av ny teknik i elnät

Elforsk rapport 09:31



Niclas Christoffersson, Jonas Gidlund

Februari 2009

**ELFORSK**



# Metodik för riskbaserad verifiering av ny teknik i elnät

Elforsk rapport 09:31



## Förord

Denna rapport är framtagen av projektet "Metodik för riskbaserad verifiering av ny teknik i elnät", inom FoU-programmet Riskanalys 06-10 som drivs av Elforsk AB. Projektet har genomförts av Niclas Christoffersson och Jonas Gidlund, Vattenfall Power Consultant.

Syftet med projektet är att ta fram ett underlag för en systematisk metodik och verktyg för riskhantering av ny teknik i elnät.

Programmets styrgrupp består av följande ledamöter:

Arne Bergström, Vattenfall Eldistribution AB  
Horst Blüchert, Elsäkerhetsverket  
Mikael Bohjort, E.ON Elnät Sverige AB  
Leif Boström, Fortum Distribution  
Håkan Jarer, Svenska Kraftnät  
Sven-Åke Polfjärd, Föreningen Industriell Elteknik, FIE  
Sven Jansson, Elforsk AB, programansvarig

Finansiärer i programmet är:

Vattenfall Eldistribution AB  
E.ON Elnät Sverige AB  
Fortum Distribution AB  
Svenska Kraftnät  
Göteborgs Energi AB  
Skellefteå Kraft AB  
Mälarenergi Elnät AB  
Tekniska Verken i Linköping AB  
Öresundskraft AB  
Jämtkraft AB  
Umeå Energi AB  
Jönköpings Energi Nät AB  
Eskilstuna Energi & Miljö AB  
Gävle Energi AB  
Energiverken i Halmstad AB  
Sundsvall Elnät AB  
Växjö Energi Elnät AB  
Borlänge Energi AB  
Nacka Energi AB  
Föreningen Industriell Elteknik, FIE  
Elsäkerhetsverket  
Lunds Energi AB

Bertil Wahlund  
Överföring & Distribution  
Elforsk AB



## Sammanfattning

Utveckling av ny teknik samt att applicera beprövad teknik inom nya applikationsområden innebär alltid osäkerheter. Rapporten beskriver en metodik för hur man i ett tidigt stadium ska kunna minska dessa osäkerheter och bättre förutsäga om tekniken uppfyller funktionskrav, säkerhetskrav, tillförlitlighetskrav, ekonomiskt ställda krav och tillgänglighetskrav i den miljö systemet ska verka i.

Utgångspunkten för denna metodik är att ge framtida förutsättningar för att skapa en så robust lösning för elleverans som ur ett ekonomiskt perspektiv är accepterat.

Kostnaderna för en ny teknik föreslås analyseras i en förenklad Life cycle cost-analys (LCC). En bakomliggande modell uppbyggd som en Failure Mode Effect Analysis (FMEA) fungerar som indatamodell till LCC:n. I FMEA:n simuleras alla risker knutna till kostnadsdrivande parametrar genom Monte Carlo-simuleringar. Detta resulterar i slutänden i ett mer informativt beslutsunderlag än om enbart singulära parametrar med icke redovisade osäkerheter har använts.

## Summary

Developing new technology or applying known techniques in new environments are always related to risks. Because of the novelty of the technique and the lack of operational experience there are great uncertainties in the information. Therefore it is important to identify, assess, evaluate and, if possible, quantify the uncertainties related to each technique of interest.

The objective in this report is to describe a model to identify and, where possible quantify uncertainties contributing to the overall economic impact due to technological risk for the technique in the electrical grid.

The basis for the model is to create such a robust solution in the electrical grid that from an economical point of view is possible.

By including uncertainties and risks associated with cost elements a Life cycle cost will be calculated using Monte Carlo simulations. This will enable an overall assessment of the uncertain costs and benefits associated with each new assessed technology.

# Innehåll

|          |                                                                                  |           |
|----------|----------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>Definitioner och akronymer</b>                                                | <b>1</b>  |
| <b>2</b> | <b>Inledning</b>                                                                 | <b>2</b>  |
| 2.1      | Syfte .....                                                                      | 2         |
| 2.2      | Bakgrund .....                                                                   | 2         |
| 2.3      | Mål .....                                                                        | 2         |
| 2.4      | Avgränsning .....                                                                | 2         |
| 2.5      | Utgångspunkt .....                                                               | 3         |
| <b>3</b> | <b>Beräkningar av tekniska system</b>                                            | <b>4</b>  |
| 3.1      | Riskhanteringsprocessen .....                                                    | 4         |
| 3.2      | Livstidskostnader .....                                                          | 4         |
| 3.3      | Riskhantering vid införande av nyteknik.....                                     | 5         |
| <b>4</b> | <b>Valideringsmodell</b>                                                         | <b>7</b>  |
| 4.1      | Krav på vald modell .....                                                        | 7         |
| 4.2      | Val av analysmodell .....                                                        | 7         |
| 4.3      | Applicering av modellen i förhållande till en produkts utvecklingsstadier ..     | 8         |
| <b>5</b> | <b>Indata</b>                                                                    | <b>11</b> |
| 5.1      | Indata relaterad till fel och feltider .....                                     | 11        |
| 5.2      | Icke direkt felrelaterad indata .....                                            | 12        |
| 5.3      | Konsekvenser knuta till fel .....                                                | 12        |
| <b>6</b> | <b>Flödesschema för metodiken</b>                                                | <b>13</b> |
| 6.1      | Syftet med metodiken .....                                                       | 13        |
| 6.2      | Mål med metodiken .....                                                          | 13        |
| 6.3      | Två analysnivåer .....                                                           | 13        |
| 6.4      | Flödesschema för metodiken .....                                                 | 14        |
| 6.5      | Preliminär analys.....                                                           | 15        |
| 6.5.1    | Genomförande .....                                                               | 16        |
| 6.6      | Klassas systemet som ny teknik? .....                                            | 18        |
| 6.7      | Systemnedbrytning.....                                                           | 18        |
| 6.7.1    | Genomförande .....                                                               | 19        |
| 6.8      | Kvantifiering .....                                                              | 21        |
| 6.8.1    | Kvantifiering .....                                                              | 21        |
| 6.8.2    | Kvalitativ bedömning .....                                                       | 22        |
| 6.8.3    | Semikvantitativ bedömning .....                                                  | 22        |
| 6.8.4    | Kvantitativ bedömning .....                                                      | 23        |
| 6.8.5    | Kvantitativ analys med osäkerheter .....                                         | 24        |
| 6.9      | Beräkningar.....                                                                 | 25        |
| 6.9.1    | Singulära värden .....                                                           | 25        |
| 6.9.2    | Beräkningar med osäkerheter .....                                                | 25        |
| 6.9.3    | Tillståndsberäkningar – Parallella system, Redundans alt. Effektförsämring ..... | 26        |
| 6.10     | Analys av data .....                                                             | 27        |
| 6.10.1   | Teknikanalys av ansatta Singulära värden.....                                    | 27        |
| 6.10.2   | Teknikanalys av ansatta värden med osäkerheter .....                             | 28        |
| 6.10.3   | Nuvärdesberäkning.....                                                           | 29        |
| 6.10.4   | Känslighetsanalys.....                                                           | 30        |
| 6.10.5   | Sammanfattning av analysen .....                                                 | 31        |
| 6.11     | Designrevision .....                                                             | 31        |
| 6.12     | Komponenttester.....                                                             | 32        |

|                 |                                         |           |
|-----------------|-----------------------------------------|-----------|
| 6.13            | Uppdateringar och uppföljningar .....   | 32        |
| <b>7</b>        | <b>Nackdelar med analysmodellen</b>     | <b>33</b> |
| <b>Bilaga 1</b> | <b>Modell av analysmetodiken</b>        | <b>35</b> |
| <b>Bilaga 2</b> | <b>Uppställning av preliminäranalys</b> | <b>36</b> |
| <b>Bilaga 3</b> | <b>Genomförande av komponentanalys</b>  | <b>37</b> |
| <b>Bilaga 4</b> | <b>Uppställning av komponentanalys</b>  | <b>38</b> |
| <b>Bilaga 5</b> | <b>Exemplifierat genomförande</b>       | <b>39</b> |

# 1 Definitioner och akronymer

Felfrekvens Se felintensitet

Felintensitet Förväntat antal felhändelser per tidsenhet,

FMEA Failure Mode Effect Analysis. Teknisk riskanalysmodell.

ILE Icke Levererad Energi, Hur mycket energi som kopplas bort då ett fel inträffar.

MDT Mean Down Time - Hindertid. Ett medelvärde på den totala tid som system ej är funktionsdugligt. Variabeln utgör sambandet MTTR+MWT.

MTBF Mean Time Between Failure - Medeltid mellan fel. Detta är ett mått på hur ofta fel inträffar på systemet.

MTTF Mean Time To Failure - Medeltid till fel.

MTTR Mean Time To Repair- Medelreparationstid. Den tid det tar för att reparera trasig utrustning. I detta mått ingår även tiden det tar för att starta upp reparationsåtgärden. Här kan exempelvis helgdagar, sjukdom eller dåligt väder bidra till ökad tid.

MWT Mean Waiting Time - Medelväntetid innan påbörjad reparation. Anger hur lång väntetiden är för exempelvis reservdelstransporter.

Ny teknik Teknik som är tekniskt obeprövad eller beprövad teknik som appliceras i nya miljöer.

Risk Kombination av en slumpmässig händelse med negativa konsekvenser för människors liv, hälsa eller miljö samt sannolikheten för denna händelse.

RPN Risk Priority Number – Prioriteringssystem för icke kvantifierbara system.

## 2 Inledning

### 2.1 Syfte

Syftet med rapporten är att ta fram ett underlag för att etablera ett systematiskt arbetssätt för riskhantering i samband med utveckling, försäljning, upphandling och implementering av ny teknik för applikationer avsedda för elnät.

### 2.2 Bakgrund

Utveckling och anskaffning av ny teknik eller att applicera beprövad teknik inom nya applikationsområden innebär alltid osäkerheter. Följande rapport beskriver en metodik för hur man på ett tidigt stadium ska kunna minska dessa osäkerheter och bättre förutsäga om tekniken uppfyller funktionskrav, säkerhetskrav, tillförlitlighetskrav, ekonomiskt ställda krav och tillgänglighetskrav i den miljö systemet ska verka i. Metodiken innebär även att val av tester och testmetoder anpassas efter de feltillstånd som finns inom tekniken. Således kan dyra testprogram som inte adresserar de inneboende feltillstånden undvikas och en bättre ekonomi i utvecklingsarbetet uppnås. Det innebär även att risken för ökade kostnader på grund av försenar kan minskas.

Idag används en liknande metodik framgångsrikt av de stora oljebolagen och dess leverantörer i Norge. Metodiken behöver dock vidareutvecklas och anpassa till de krav och förutsättningar som finns för elnäten i Sverige.

### 2.3 Mål

Målet med metodiken är att ge branschen ett verktyg och en övergripande strategi för riskhantering genom verifiering av ny teknik. Ett verktyg som syftar till att bättre kunna förutsäga om tekniken uppfyller funktionskrav, säkerhetskrav, tillförlitlighetskrav och tillgänglighetskrav i den miljö systemet ska verka i.

### 2.4 Avgränsning

Då rapporten är en genomgång av ett förslag till en arbetsmetodik för verifiering av ny teknik som bygger på modeller av riskhantering, och inte en rapport om ämnet riskhantering, förutsätts läsaren ha viss grundkunskaper inom riskhanteringsprocesser och dess ingående verktyg.

Denna rapport avses endast användas för produkter och produktutvecklingsprojekt avsedda att användas för drift av det svenska elnätet.

Rapporten behandlar endast risker och osäkerheter som kan härledas till den tekniska lösningen. Politiska risker, legala risker och marknadsrisker kommer inte att beröras.

Rapporten kommer ej att jämföra olika typer av metoder för att behandla osäkerheter i tekniska system, utan enbart ge ett förslag på en metodik för att verifiera ny teknik och analysera dess osäkerheter.

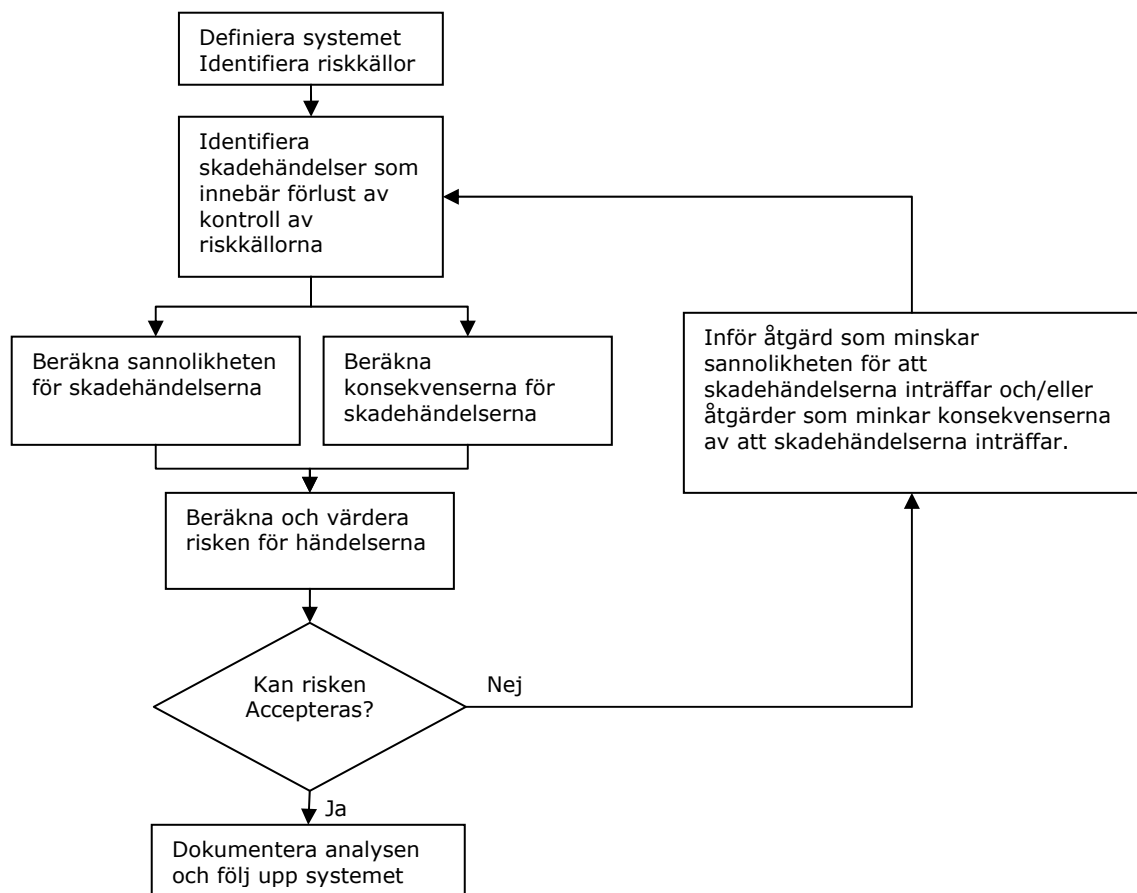
## 2.5 Utgångspunkt

Utgångspunkten för metodiken som beskrivs i denna rapport är att ge framtida förutsättningar för att skapa en så robust lösning för elleverans som ur ett ekonomiskt perspektiv är accepterat. Med detta menas att tekniken i ett befintligt nät ska kunna jämföras i kostnader, tillgänglighet, tillförlitlighet och säkerhet mot nya tekniker vad gäller inköp, drift och underhåll. Detta för att minska den totala livscykelkostnaden för en specifik teknisk lösning.

## 3 Beräkningar av tekniska system

### 3.1 Riskhanteringsprocessen

För att kartlägga, identifiera, beräkna och hantera osäkerheter i olika tekniska system används systematiserade arbetsmetoder, Riskhanteringsprocesser. De idag använda processerna har i flera fall liknande uppbyggnader. *Figur 1 Gången för en riskbedömning (Grimvall, 2003)* beskriver en typ av modell av dessa arbetsmetodiker.



**Figur 1** Gången för en riskbedömning (Grimvall, 2003)

I denna rapport skapas, ur en generell modell av en riskhanteringsprocess, en anpassning till en metodik för att detaljerat bedöma och värdera olika grader av osäkerheter vid införande och anskaffning av ny teknik inom elnät.

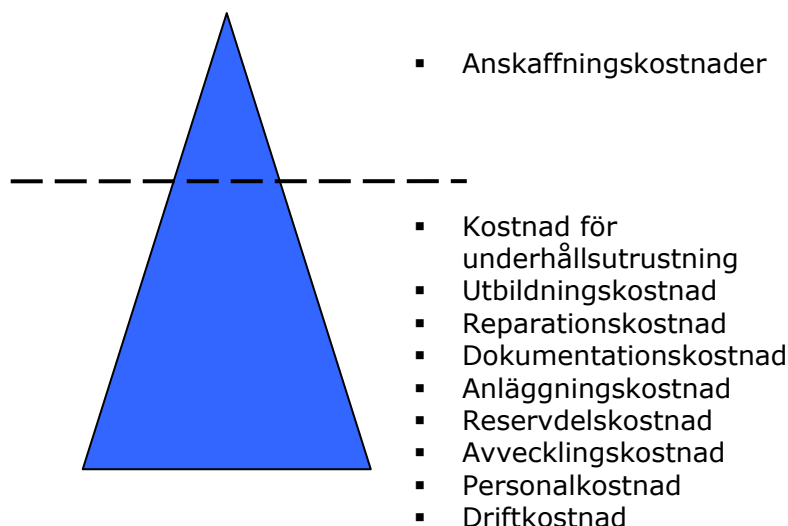
Rapporten behandlar inte hur en metodikanpassning kan ske för mer generella processer. För mer information om generella metoder se exempelvis Räddningsverkets dokumentation (Räddningsverket, 2003).

### 3.2 Livstidskostnader

Då drift- och underhållskostnaderna under teknikens livstid många gånger är större än själva anskaffningskostnaden är dessa två viktiga parametrar att

studera vid anskaffning av teknik till elnätet. Metodiken för att göra detta kallas LCC (Life Cycle Cost). Dess syfte är beräkna och att jämföra olika investeringsalternativ. Utformandet av modellen ska avspegla verkligheten och utformas efter kalkylens syfte (FMV, 2006).

Förhållandet mellan anskaffningskostnader och konstanter under livstiden illustreras nedan enligt *"Isbergsmodellen"* (FMV, 2006).

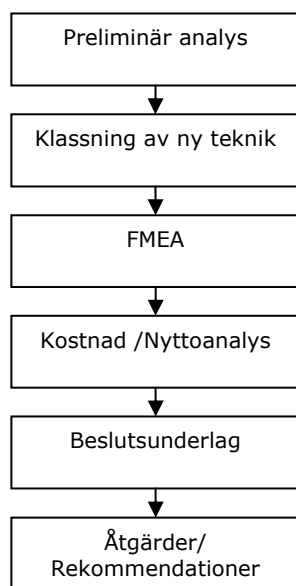


**Figur 2** Förhållande mellan anskaffnings samt drift- och underhållskostnader

I metodiken i denna rapport kommer LCC att förenklas till att enbart studera LSA- (Life Support Cost) och LAC- (Life Acquisition Cost)-kostnader. Dessa kommer i sin tur begränsas till kostnadsdrivande faktorer knutna till anskaffning och fel under teknikens livstid.

### 3.3 Riskhantering vid införande av nyteknik

Den analysmetodik som kommer att presenteras i denna modell byggs upp enligt följande förenklade arbetssätt.



**Figur 3** Förenklad arbetsmodell för verifiering av ny teknik.

I modellen genomförs respektive steg helt avskilt från de övriga. Med detta menas att samtliga steg avslutas helt innan nästa påbörjas. Den enda överföringen som sker mellan stegen är därför ren icke aktivitetsbunden information.

Målet med arbetsmodellen är att beslutfattare, efter att modellen är genomarbetad, visar ett beslutsunderlag som gör att hon/han kan antingen verifierar, eller förkastar systemlösningen utifrån uppsatta mål och krav.

*Tänk på: Då många utav indataparametrarna kommer att innehålla olika grader av osäkerheter kommer ovan nämnda beslutsunderlag ge riktvärden snarare än exakta värden.*

## 4 Valideringsmodell

En traditionell investeringskalkyl ger ofta intryck av att det får att förutspå framtida samband och utfall exakt. Så är naturligtvis inte fallet i verkligheten. När osäkerheten blir mer påtaglig måste sannolikheten för olika utfall framgå av beslutsunderlaget. För att på ett korrekt sätt hantera, kartlägga och redovisa dessa osäkerheter vid ny teknik bör en systematisk modell för detta användas. Ett exempel på hur den modellen kan utformas beskrivs nedan.

### 4.1 Krav på vald modell

En analys för att bedöma osäkerheterna i ny teknik är generellt mer resurskrävande än för motsvarande analys av teknik som redan är känd och implementerad. Detta beror dels på att nödvändig information för existerande verifierad teknik i de flesta fall redan finns tillgänglig. Några exempel på denna information är fastställda tekniska systemlösningar, empirisk data samt att underhålls- och reparationsplaner är väl genomarbetade

Till skillnad från valet av analysmetod i Kylefors rapport (Kylefors, 2007) gör bristen på information att modellen bör vara mer detaljerad och genomgående. Detta för att på ett rättvist sätt kunna jämföra olika tekniker genom för att så långt som möjligt säkerställa att samtliga tekniska fel som kan uppstå och dess konsekvenser kartläggs.

Analysmodellen bör på ett systematiskt sätt hantera alla typer av teknik som används i elnätet. Den bör även vara anpassningsbar för samtliga tänkbara grader av detaljering i elnätet, från övergripande nätnivå ner till komponentnivå. Detta gör att modellen på ett strukturerat sätt ska kunna klara av flera detaljnivåer, flera felscenarion och stora mängder data.

Resultatet av analysen ska gå att använda för att kunna utforma testmetoder som är anpassade till de osäkerheter som finns inbyggda i systemen. Tillika ska resultatet även kunna användas för att bekräfta att tillverkarna uppfyller de av inköpare ställda krav.

Ytterligare krav är att analysmodellen bör i sin grund vara allmänt accepterad inom branschen.

Läs i Riskanalys lokalnät (Kylefors, 2007) för mer generella krav och utförligare beskrivning av analysmodellen för att kartlägga risker.

### 4.2 Val av analysmodell

Arbetsmetodiken som presenteras är baserad på en arbetssättet i riskanalysmodellen Failure Mode Effect Analysis (FMEA). Denna modell uppfyller samtliga av de krav som är listade i kapitel 4.1 ovan.

FMEA:n kompletteras med en grov LCC-analys för att i ett tidigt skede lokalisera kostnad och nyttdrivande parametrar. Denna del av arbetet benämns i rapporten Preliminär riskanalys.

Resultatet presenteras lämpligen i form av en kostnad nyttoanalys med ansatta spridningsparametrar.

### 4.3 Applicering av modellen i förhållande till en produkts utvecklingsstadier

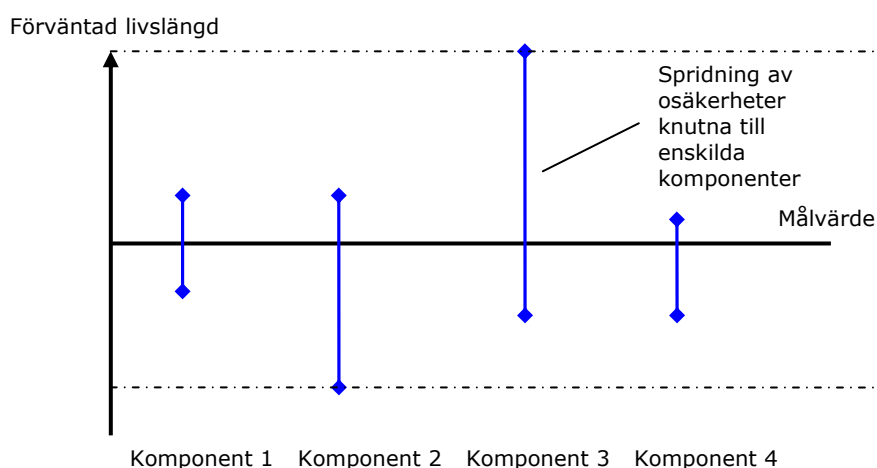
Beroende på i vilket stadium av utvecklingen en teknik befinner sig innehar den olika osäkerheter knutna till dess system och komponenter. Denna osäkerhet är ej konstant och kommer därför att variera i samband med att tekniken utvecklas.

Studeras en teknik momentant i en fas av utvecklingen kan exempelvis spridningen av osäkerheterna för fyra komponenters felfrekvenser i en tekniks uppbyggnad se ut enligt tabell 1 nedan.

**Tabell 1** Figur 4 i tabellform

| Komponent   | Förväntad Livslängd |                |                |
|-------------|---------------------|----------------|----------------|
|             | Min                 | Förväntad      | Max            |
| Komponent 1 | $\lambda_{11}$      | $\lambda_{12}$ | $\lambda_{13}$ |
| Komponent 2 | $\lambda_{21}$      | $\lambda_{22}$ | $\lambda_{23}$ |
| Komponent 3 | $\lambda_{31}$      | $\lambda_{32}$ | $\lambda_{33}$ |
| Komponent 4 | $\lambda_{41}$      | $\lambda_{42}$ | $\lambda_{43}$ |

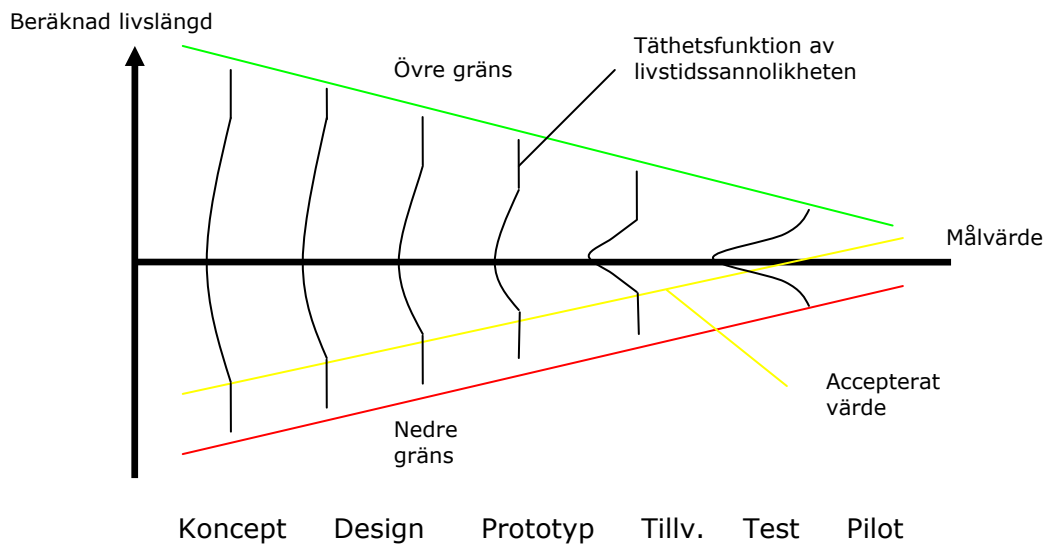
Spridningen av komponenternas felfrekvens är direkt knuten till de olika förväntade livslängderna. Detta åskådliggörs illustrativt i figur 4 nedan.



**Figur 4** Illustration av spridning av osäkerheter för komponenter i ett utvecklingsstadium.

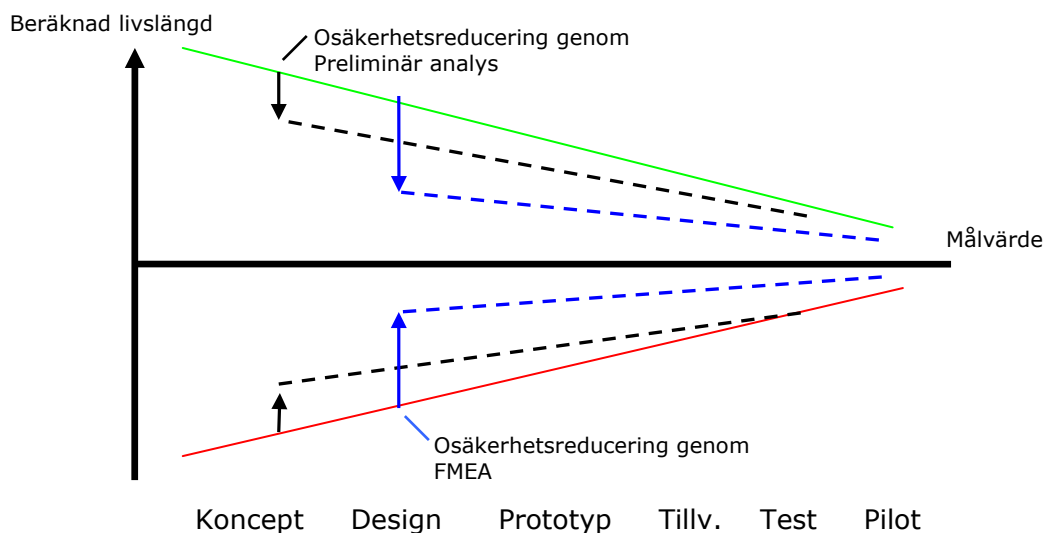
Spridningen ovan kommer att förändras under produktens utveckling och förhoppningsvis minskas innan tekniken kommer ut på marknaden.

Adderas de olika spridningarna över tiden erhålls figur 5, vilken illustrerar hur osäkerheten förväntas variera mellan de olika produktutvecklingsstadierna. Figuren visar även hur tidsperioden för de olika stadierna förväntas variera med osäkerheter över tiden.



**Figur 5** Variation av graden av osäkerheter över tiden för ny teknik (Carbon trust, 2005)

Spridningen av graden för osäkerhet gör att en analysmetodik för verifiering av ny teknik måste vara anpassningsbar till var i utvecklingen (den nya) tekniken befinner sig. Med detta menas att omfattningen på analysen kommer att skilja sig åt beroende på i vilket steg av utvecklingen tekniken är. De olika stegen i analysen kommer därför att bidra olika mycket till minskning av osäkerheter knutna till tekniken. Både den preliminära analysen och FMEA:n har som störst bidrag till att minska osäkerheterna i ett tidigt stadium av teknikutvecklingen. FMEA:n fortsätter att bidra till osäkerhetsminskningar genom hela teknikens livslängd medan bidraget från den preliminära analysen efter hand fasas ut. Detta illustreras i figur 6 nedan. Vidare kommer olika typer av komponenttester att bidra till en minskning av osäkerheterna.



**Figur 6** Preliminäranalysens och FMEA:ns påverkan på osäkerheterna knutna till den nya tekniken.

Mot bakgrund av ovanstående ska den metodik som presenteras i kapitel 5 vara anpassningsbar till var i produktcykeln tekniken befinner sig. Med detta menas att vissa delar av metodiken eller systemanalysen kommer att variera beroende på teknikens befintliga utvecklingsstadium.

## 5 Indata

*I det här kapitlet presenteras den indata som kommer att krävas, och därför ska hållas tillgänglig, för att genomföra en kvantitativ eller kvalitativ analys på den nya tekniken.*

### 5.1 Indata relaterad till fel och feltider

För att analysen ska resultera i ett så rättvisande värde som möjligt bör olika felrelaterade variabler kunna presenteras för de ingående parametrarna i analysens nedbrytning. Se kapitel 6 för vidare detaljer om nedbrytningen. Samtliga av dessa indata är direkt otillgänglighets och kostnadsdrivande. Med detta menas att ett högre värde resulterar i högre kostnader och/eller mindre tillgänglighet.

För att kunna genomföra en analys på en grundläggande nivå bör följande parametrar redovisas.

- Felfrekvens – Antalet fel per tidsenhet.
- MTBF (Mean Time Between Failure) – Medeltid mellan fel. Detta är ett mått på hur ofta fel inträffar på systemet.
- MTTF (Mean Time To Failure) – Medeltid till fel.
- MTTR (Mean Time To Repair) – Reparationstid. Den tid det tar för att reparera trasig utrustning. I detta mått ingår även tiden det tar för att starta upp reparationsåtgärden. Här kan exempelvis helgdagar, sjukdom eller dåligt väder bidra till ökad tid.
- MWT (Mean Waiting Time) - Medelväntetid innan påbörjad reparation. Anger hur lång väntetiden är för exempelvis reservdelstransporter.
- MDT (Mean Down Time) – Hindertid. Ett medelvärde på den totala tid som system ej är funktionsdugligt. Variabeln utgör sambandet  $MTTR + MWT$ .

Flertalet av ovanstående parametrar är direkt knutna till reparationsarbetet och därför i sin tur knutna till olika faktorer. Vid ansättning av parametrarna ovan bör därför följande tidsaspekter beaktas (Moubray, 1997).

- Tid för att komma i kontakt med person som kan reparera felet.
- Tid för att diagnostisera felet.
- Tid för att lokalisera reservdelar.
- Logistiktid för reservdelar.
- Tid för reparationsarbetet.
- Tid för att testa systemet innan uppstart.
- Uppstartstid.

## 5.2 Icke direkt felrelaterad indata

För att genomföra analysen kommer det även att krävas indata av typen som inte är direkt knutna till felen. Dessa kan till exempel vara.

- Kalkylränta
- Systemets/komponentens beräknade livstid

## 5.3 Konsekvenser knuta till fel

I samband med att fel inträffar uppstår olika konsekvenser av dem. Vissa av dessa är dynamiska och direkt knutna till tidigare angivna tidsaspekter medan andra kan vara av mer statisk karaktär.

Vid bedömning av konsekvenser är det av vikt att bestämma vilken typ av faktorer som är av intresse att undersöka. Ett mycket vanligt alternativ är att undersöka hur kostnaderna och tillgängligheten påverkas i förhållande till olika tekniklösningar. Det är på detta fokus ligger i denna rapport. Övriga undersökningsparametrar kan exempelvis vara säkerhet-, hälsa- eller miljöaspekter. Vad som väljs som konsekvensparameter beror på vad som anses vara av vikt att undersöka. Viktigt är dock att alla ansatta parametrar speglas utifrån just den valda typen av konsekvens.

Ur ett kostnadsperspektiv är bland annat följande konsekvenser beroende av olika tidsberoende parametrar.

- Reparationskostnader
- Kostnad för underhållspersonal
- Maskinkostnader
- Icke levererad energi (ILE)

## 6 Flödesschema för metodiken

*I detta avsnitt presenteras mer detaljerat ett flödesschema för hur metodiken ska genomföras.*

### 6.1 Syftet med metodiken

Syftet med metodiken som presenteras i detta avsnitt är (IEC, 2006)

- Kunna identifiera fel som har oönskade effekter på systemet under hela produktcykeln.
- Visa att en teknik uppnår kundens kravställning så långt som det tekniskt eller ekonomiskt är möjligt
- Möjliggöra förbättringar av systems tillförlitlighet eller säkerhet under hela produktcykeln
- Möjliggöra förbättringar för drift och underhåll av systemet
- Möjliggöra förbättrad och mer effektiv testperiod

### 6.2 Mål med metodiken

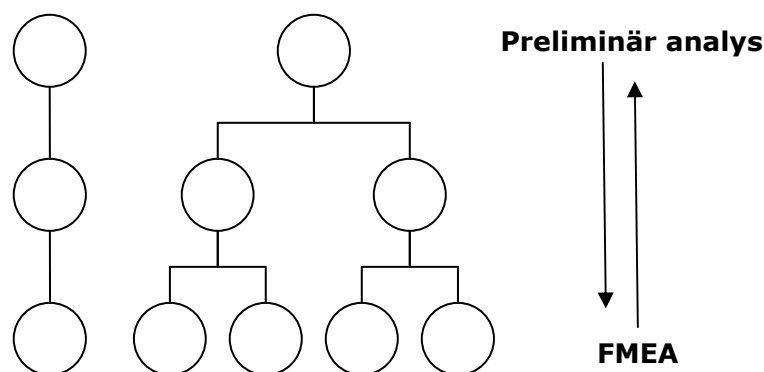
Målen kan sammanfattas på samma sätt som i IEC (2006)

- En sammanfattad identifiering och värdering av oönskade effekter inom analysens systemavgränsningar.
- Identifiera alla felhändelser som kan inträffa vid alla typer av fel, och i alla nivåer, som kan inträffa i systemet.
- Analysera kriticiteten och prioriteringsordning av hindrande eller lindrande åtgärder för att bibehålla önskad funktion hos avsett system.
- Klassificera identifierade fel med hänsyn till detektion, felsökning, testbarhet, utjämning samt möjlighet till drift och underhåll.
- Identifiering av funktionsfel och uppskattning av allvarlighet och sannolikhet för inträffande.
- Bidra till designförbättringar.
- Bidra till utvecklande av en effektiv drift och underhållsplan.
- Bidra till minskade kostnader för testfasen för ny, obekräftad teknik.
- Bidra till mer relevanta och objektiva testprocedurer i testfasen.
- Bidra till underlag för drift- och underhållsinstruktioner/ -planering.

### 6.3 Två analysnivåer

Alla tekniska system har en typ av inre systemuppbyggnad. Dessa systemuppbyggnader kan vara seriella, parallella, trädformade mm. Oavsett typ av uppbyggnad finns det i de tekniska systemen en övergripande funktion. Den övergripande funktionen fungerar i sin tur genom påverkan från olika system, delsystem och komponenter. Exempel på sådana uppbyggnader

kan vara stamnät, regionnät och lokalnät eller ett ställverk med inre komponenter som brytare, frångiljare och mättransformatorer. Hur dessa systemuppbyggnader kan se ut illustreras nedan i figur 7.



**Figur 7** Illustration av hur olika analysmetoder i metodiken ska användas för att studera tekniska system.

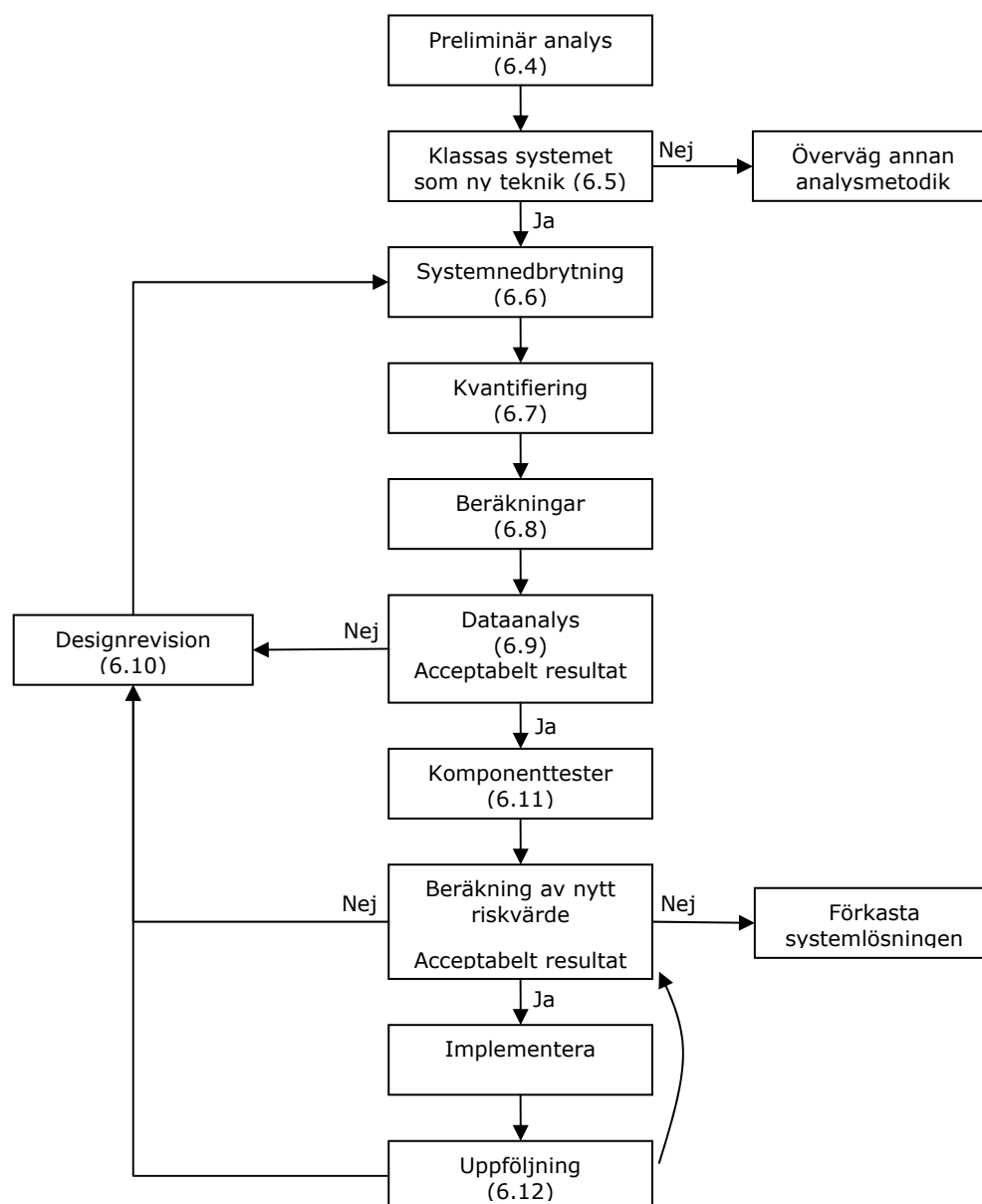
Metodiken som beskrivs i denna rapport bygger på att systemen analyseras från två olika nivåer.

Den preliminära analysen ska användas för att i ett tidigt stadium och på ett mycket övergripande sätt avgöra om tekniken i sin helhet uppnår ställda krav eller inte. *För mer information om krav se kap 6.5.*

FMEA:n används därefter för att detaljstudera tekniken och avgöra var tekniskt sett de större felkällorna finns. Målet med metodikens användande är därefter att från resultatet i FMEA:n, vid behov, förändra den tekniska lösningen så att tekniken kan möta krav uppsatta i den preliminära analysen.

## 6.4 Flödesschema för metodiken

Nedan visas en schematisk bild av analysmetodiken. De olika stegen beskrivs mer i detalj i kommande avsnitt. Siffrorna i figuren anger respektive kapitelnummer. Figuren går även att finna i Bilaga 1.



**Figur 8** Flödesschema för metodikens genomförande

## 6.5 Preliminär analys

För att på ett så tidigt stadium som möjligt kunna avgöra om en teknik är ekonomiskt hållbar bör initialt en grovre analys genomföras. Denna procedur kan jämföras med en preliminär-/grovanalys i andra typer av riskanalyser. Skillnaden är att i andra metodiker går arbetet ut på att baserat på felkällor sortera ut risker, medan denna metodik identifierar både osäkerheter och kostnadsdrivande parametrar.

Den preliminära analysen i denna metodik syftar till att genom en grov förenklad LCC-analys avgöra huruvida den nya tekniken är ekonomiskt

gångbar, samt vilka faktorer som är mest kostnadsdrivande i den löpande funktionen.

Vid en analys av enstaka komponenter kan detta steg vara överflödigt då det inte kommer att ge ytterligare än den redan kända information.

### 6.5.1 Genomförande

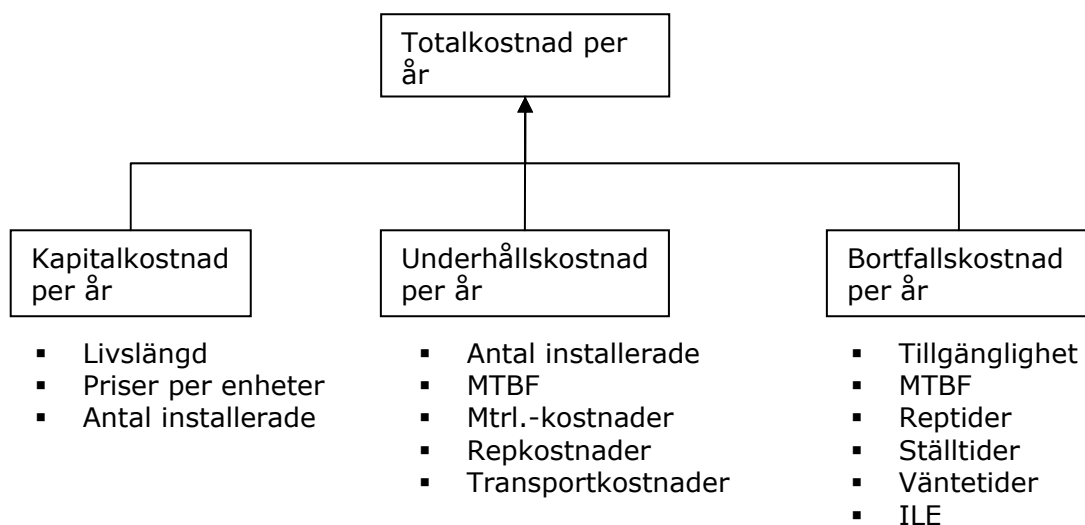
Den preliminära analysen genomförs i form av gemensamma teknikgenomgångar tillsammans med personal från konstruktören och vid behov även genom djupintervjuer. Deltagarna under dessa genomgångar ska väljas utifrån sina kunskaper och erfarenheter inom den nya teknikens områden. Exempel på dessa kunskapsområden kan vara underhållsexpertis, driftexpertis, installationsexpertis mm. Genomgångarna ska resultera i uppförande av ett kalkylblad där beräkningar och simuleringar av olika variabler, såväl tekniska som ekonomiska, ska visa ekonomiska nyckeltal för tekniken. Exempel på kalkylblad finns i Bilaga 2.

Då ovan nämnda nyckeltal kommer att beräknas utifrån variabla värden krävs det att variablerna ansätts innan eller i samband med analysen. Exempel på dessa variabler redovisas nedan i tabell 2 .

**Tabell 2** Variabler vid den preliminära analysen

| Variabler                       | Kommentar                              |
|---------------------------------|----------------------------------------|
| Livslängd                       | Den initialt uppskattade               |
| Annuitetsfaktor                 |                                        |
| Internränta                     |                                        |
| Antalet enheter per system      |                                        |
| Enhetspris inköp                |                                        |
| Medeltid mellan fel per enhet   | MTBF                                   |
| Reparationskoncept              | Antal/rep,      Ersättningspris<br>mm. |
| ILE                             |                                        |
| Förväntad MDT vid fel           | Består av MTTR och MWT                 |
| Förväntade Reparationskostnader |                                        |

Genom beräkningar i kalkylbladet där variablernas beroende sätts upp enligt figur 9, kan de ekonomiska nyckeltalen beräknas. Exempel på dessa nyckeltal ges i Tabell 3.



**Figur 9** Parametrarnas förhållningssätt enligt den förenklade LCC-analysen

**Tabell 3** Resultat av den Preliminära analysen

| Variabler                                  | Kommentar                  |
|--------------------------------------------|----------------------------|
| Kapitalkostnad per år                      |                            |
| Underhållskostnad per år                   |                            |
| Reparationskostnad per år                  |                            |
| Transportkostnader per år                  |                            |
| Materielkostnad per år                     |                            |
| Sekundära kostnader knutna till fel per år | Exempelvis ersättningskrav |

I de fall där variabler eller nyckeltal kan anses vara krav från exempelvis inköpare bör de ansättas utifrån detta.

Genom att ansätta olika värden på variablerna i den preliminära analysen kommer känsligheten i systemet för de olika parametrarna att påvisas. Tillika kan det för en tillverkare vara av stort intresse att se hur stora variationer av parametrarna som systemet klarar för att fortfarande ligga inom en kunds krav.

Exempel på dessa krav från kunden är

- Tillgänglighet
- Kostnader
- Tid mellan fel
- Tillgänglighet
- Kostnader per enhet

## 6.6 Klassas systemet som ny teknik?

Målet med detta steg är att klassificera om tekniken som undersöks är ny teknik eller känd sedan tidigare. Syftet är att reducera arbetet då, enligt tidigare, en analys av ny teknik många gånger är mer omfattande, tidskrävande och kostnadsdrivande än för redan känd och beprövad teknologi, vilket gör att en tidig klassificering är nödvändig.

För att avgöra om tekniken kan klassas som ny bör framförallt följande parametrar studeras.

- Är utrustningen/tekniken beprövad?
- Är utrustningen/tekniken beprövad i denna typ av miljö?
- Är utrustningen/tekniken beprövad i kombination med övrig teknisk utrustning i systemet?
- Är utrustningen/tekniken beprövad för detta ändamål?

Uppfylls inte alla parametrar ovan är utrustningen/tekniken i de flesta fall att klassa som ny teknik.

Ovanstående procedur går även att klassa med hjälp av en matris enligt nedan.

**Tabell 4** Klassning av obeprövad teknik (Carbon Trust, 2005), fritt översatt

| Appliceringsområde | Teknik |                    |                    |
|--------------------|--------|--------------------|--------------------|
|                    | Känd   | Begränsad historik | Ny eller obeprövad |
| Känd               | 1      | 2                  | 3                  |
| Okänd              | 2      | 3                  | 4                  |

System som klassas med en etta är här att betraktas som känd teknologi och omfattas därför inte av denna metodik. Samtliga övriga tekniker som klassas med siffran 2 eller högre är att se som ny teknik. Dessa tekniker kan därför verifieras med analysmetodiken i denna rapport.

Om tekniken inte kan klassas som ny teknik bör andra mindre omfattade metoder för en eventuell riskanalys övervägas. Se exempelvis Handbok för riskanalys (Räddningsverket, 2003).

## 6.7 Systemnedbrytning

Det är i detta steg av analysen som metodikens arbetsinsats är som störst. Beroende på teknikens detaljering och utformning kan detta steg tillsammans med efterföljande kvantifiering ta från ett par timmar till flera arbetsveckor. En tidsåtgång på upp till en arbetsvecka är normalt för mindre omfattande tekniska system.

Syftet med systemnedbrytningen är att bryta ned tekniken till hanterbara element och för att skapa en preliminär sortering för att senare kunna värdera och hantera osäkerheterna och riskerna i tekniken.

Detta steg ska genomföras i form av en gemensam riskgenomgång och det krävs att samtliga experter med kunskap om tekniken är närvarande eller snabbt anträffbara. Vidare är det av stor vikt att en person med erfarenhet att leda en Riskworkshop är utsedd att leda arbetet. Detta för att arbetet ska bli

så strukturerat och detaljerat som möjligt, samt för att i möjligaste mån undvika skevhet i resultatet på grund av deltagarnas egna personliga riskperception.

En stor mängd detaljerad system- och tekniskdokumentation kommer att krävas under arbetet, varför det är stor fördel om den finns tillgänglig under detta moment i analysarbetet.

Den information samt kunskap om området som bör finnas att tillgå vid analysen är följande.

- Systemnedbrytning
- Design kriterier
- Felstatistik i den mån det går
- Ritningar
- Underhållsmanualer/ idéer
- Installationsmanualer
- Driftmanualer
- Bemanning
- Reparationsinstruktioner

#### 6.7.1 Genomförande

Genomförandet av FMEA:n sker genom att på ett systemhierarkiskt sätt dela upp tekniken i system, delsystem och undersystem. System- och delsystemuppdelningen görs med fördel där naturliga funktionsgränser finns i tekniken. Beroende på komplexiteten och detaljeringsgraden i tekniken kan ytterligare undersystem behöva definieras till delsystemen.

Delsystemen och undersystemen ska sedan i sin tur delas upp i funktioner, komponentgrupper eller komponenter. Nivån på denna uppdelning är helt beroende av hur detaljerad data om indataparametrarna som går att finna. Med detta menas att systemnedbrytningen sker tills detaljeringsgraden är så noggrann att det är möjligt att bedöma om de enskilda delarna kan klassas ny teknik eller inte. Om detta ej är möjligt bryts systemet ned så långt som nedbrytningen tillför ny information eller det anses tekniskt nödvändigt. Det ger med andra ord inget mervärde att bryta ner komponenter eller system som inte kan klassas som nya och som det finns dokumenterad data för.

Observera att en alltför detaljerad nedbrytning gör arbetet komplext. BS 5760: del 5 (BS, 1991) rekommenderar att analysen inte sker djupare än i två nivåer varför systemavgränsningen bör anpassas till detta. Det är därför viktigt att välja rätt graderingsnivå både på systemavgränsningen och på den initiala systemuppdelningen. Att försöka analysera ett helt elnät från nätnivå ner till komponentnivå i samma analys kommer att medföra oöverskådligt stora datamängder, samt innehålla så pass många antaganden och osäkerheter att ett resultat på högre nivåer troligtvis inte kommer att bli rättvisande eller tillräckligt informativt.

*Tänk på: En fördel med att detaljstrukturera systemet så tidigt som möjligt är att samtliga resurser inte behöver närvara under hela analysen utan behöver endast närvara då dess kompetens efterfrågas.*

Följande data och variabler bör finnas med vid en analys.

- *System*
- *Systemuppbyggnad alt. ingående delsystem*
- *Delsystemuppbyggnad alt. ingående komponenter*
- *Funktion*
- *Funktionsfel*
- *Felorsak*
- *Feleffekt*
- Antal enheter per system/delsystem
- Feldetektion
- Sannolikhet
- MMT
- Kritikalitet
- På plats/ i verkstad
- Antal perstimmar
- Reservdelskostnad

Faktorer som är kursivt markerade ovan beskrivs verbalt i analysen medan övriga faktorer kvantifieras. Hur det senare går till beskrivs i kapitel 6.7 *Kvantifieringsmetodik*.

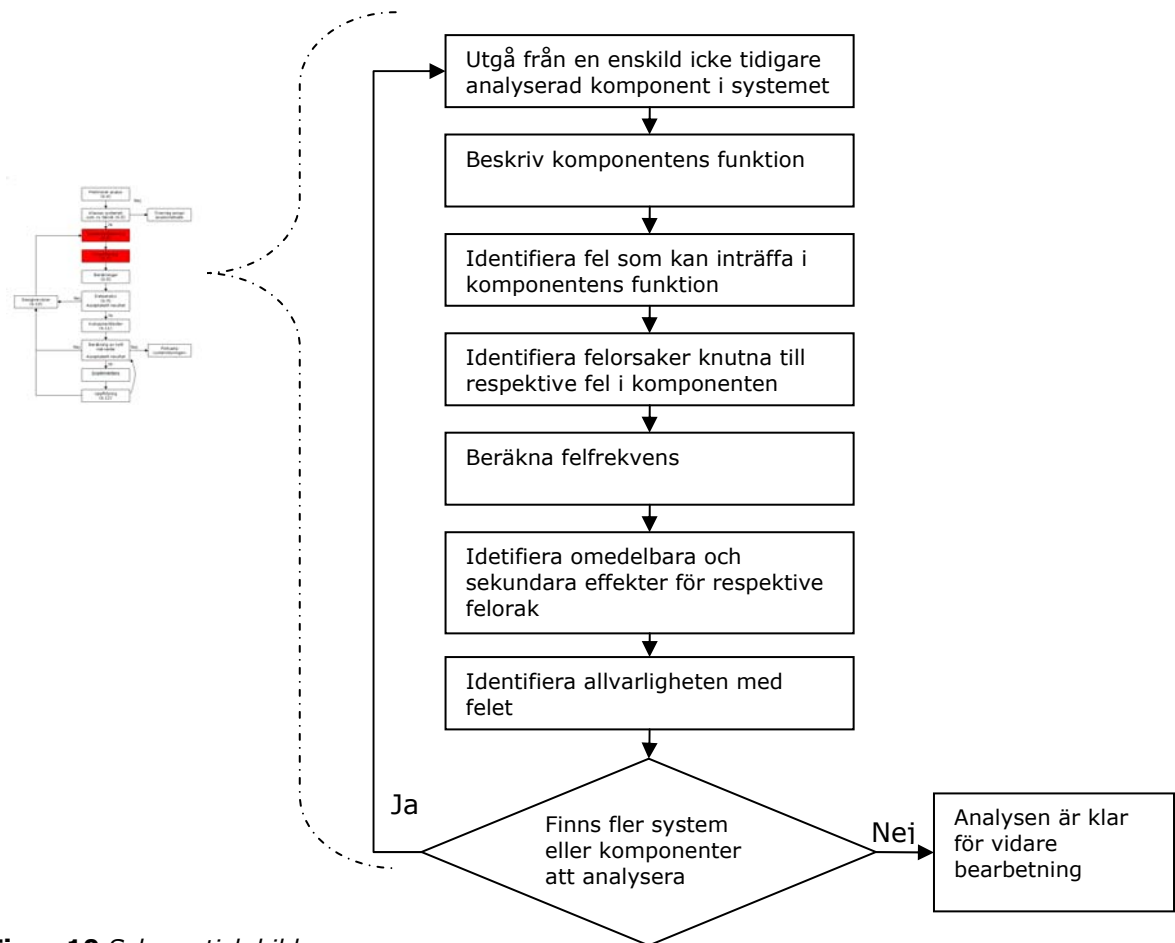
Dokumentation av systemuppdelningen och det som framkommer under analysen förs med fördel som tabellformat in i en mjukvara som klarar stora tabeller. Exempel på hur detta kan arrangeras i tabellform ses i tabell 5 nedan. En mer fullständig nedbrytning går att finna i Bilaga 4.

**Tabell 5** Exemplifierad uppställning av FMEA för ett ställverk.

| System    | Delsystem    | Komponent        | Funktion | Funktionsfel | Felorsak | Feleffekt | Antal enheter per delsystem |
|-----------|--------------|------------------|----------|--------------|----------|-----------|-----------------------------|
| Ställverk | Brytare      | Fjädermanöverdon | AA       | AAA          | .....    | .....     | .....                       |
|           |              |                  |          | AAB          | .....    | .....     | .....                       |
|           |              | Brytkammare      | AB       | ABA          | .....    | .....     | .....                       |
|           |              |                  |          | ABB          | .....    | .....     | .....                       |
|           |              | A                | AC       | ACA          |          |           |                             |
|           | Frånskiljare | B                | BA       | BAA          | .....    | .....     | .....                       |
|           |              |                  | BB       | BBA          | .....    | .....     | .....                       |
|           | Avledare     | C                | CA       | CAA          | .....    | .....     | .....                       |

Genomförandet sker efter systemuppdelningen där varje del av systemet analyseras i systematisk ordning

Illustrativt sker arbetsgången i varje enskild systemnedbrytning och kvantifiering enligt figur 10 nedan, som i sig är en förenkling av en modell av Hartford (Hartford, 2004). I figuren visas även hur steget förhåller sig till den övergripande metodiken som beskrivs i rapporten.



**Figur 10** Schematisk bild för genomförande av FMEA

## 6.8 Kvantifiering

*Denna del beskriver kvantifieringen av konsekvenserna till felen i systemnedbrytningen.*

### 6.8.1 Kvantifiering

Kvantifiering av risk innebär alltid hantering av osäkerhet i indata. Större inslag av kvalitativa bedömningar medför i sig större osäkerheter i analysen. Många gånger då ny teknik behandlas kommer bedömningarna att vara en kombination av känd felhistorik och kvalitativa bedömningar baserad på tillgänglig information och erfarenheter hos analysdelatagarna.

Med detta som bakgrund bör det noteras att riskhantering innebär en iterativ process där noggrannheten i de exakta värdena ökar med antalet iterationer och där de presenterade värdena till en början är initialvärden. Initialvärdena ska alltid ansättas konservativt och tolkas därefter. Den överskattning av risken som uppstår i samband med den konservativa kvantifieringen kommer att tas omhand vid upprepade iterationer. Men, att under analysen underskatta kostnadsdrivande tekniska svagheter genom att ansätta mer positiva värden kan komma att bli kostsamt i framtiden.

### 6.8.2 Kvalitativ bedömning

För ny teknik kommer det att finnas system och komponenter där osäkerheterna i variablerna är så pass stora att ett kvantitativt värde för felens konsekvens eller kritikalitet blir missvisande. För att kunna göra en riskvärdering av system uppbyggda av komponenter med beroende av dessa variabler måste systemen klassas kvalitativt.

En använd metod för att göra en kvalitativ analys av ett system är att använda så kallade Risk Priority Number (RPN). Denna metod bygger på att genom subjektiva bedömningar klassa systemens eller komponenternas kritikalitet (IEC, 2006). Genom att ansätta värden i skalvärden på kritikaliteten kan teknikens risker beräknas. Utgångspunkten för analysen är relationen

$$R = P \times S \times D$$

- P Probability: Ett värde på hur sannolikt det är att ett fel kommer att inträffa under tidsperioden eller i systemets tillstånd. Detta värde behöver inte vara kvalitativt utan kan anges igenom skalvärden.
- S Severity: Ett dimensionslöst tal på hur pass mycket ett eventuellt fel kommer att påverka systemet eller användaren.
- D Detection: Ett värde på hur troligt det är att ett fel upptäcks och elimineras före användaren eller systemet påverkas. Till skillnad från Probability och Severity ska detta värde räknas i omvänd skala eller som en nämnare till produkten ovan.

Värdena för P, S och D graderas genom skalvärden från exempelvis 1 till 10. Där 1 är det bästa värdet och 10 är det sämst tänkbara värdet.

Det framräknade värdet används sedan för att skala och skatta och rangordna vilka system som besitter störst risk i form av allv arlighet om fel uppstår. De system som rankas högst är de som bör studeras närmare utefter vilka faktorer de innehar som kan påverka kostnaderna och tillgängligheten. Om flera system uppnår samma RPN ska de inbördes rankas efter graden Severity. (IEC, 2006)

En viktig faktor med denna typ av kvalitativ analys är att hela systemet initialt analyseras på ungefär samma detaljnivå. Görs ej detta kan uppskalning eller nedbrytning av systemet bli komplicerad, både strukturellt och rent matematiskt.

### 6.8.3 Semikvantitativ bedömning

Vid de tillfällen då relevant eller exakt driftinformation inte går att få fram eller ännu ej kunnat produceras, kan värden i olika skalor användas för att ansätta frekvenser och konsekvenser. Detta arbetssätt är mycket vanligt och är att föredra initialt då det kan vara svårt att finna mer exakta värden på komponenterna i systemnedbrytningen.

Viktigt i denna arbetsprocess är att använda värden i skalorna som anpassas efter teknikens syften och miljö. Nedan ges exempel på skalor för en värmekraftsanläggning (Ehrstedt, 1997). Ytterligare exempel på hur skalorna kan anpassas är att för de olika stegen ansätta procentsatser av investeringskostnaden.

**Tabell 6** Klassning av sannolikhet

| Frekvensklass | 5                    | 4                       | 3                         | 2                           | 1                           |
|---------------|----------------------|-------------------------|---------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| Sannolikhet   | Mycket sannolikt     | ---                     | Sannolikt                 | ---                         | Mycket osannolikt           |
| Frekvens      | Mer än 1 gång per år | 1 gång per 1 till 10 år | 1 gång per 10 till 100 år | 1 gång per 100 till 1000 år | Mindre än 1 gång per 1000år |

**Tabell 7** Klassning av konsekvenser direkt knutna till kostnader

| Konsekvensklass                                | 1                                                       | 2                                             | 3                                         | 4                                                | 5                                              |
|------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|-------------------------------------------|--------------------------------------------------|------------------------------------------------|
| Konsekvenser                                   | Små                                                     | Lindriga                                      | Stora                                     | Mycket Stora                                     | Katastrofala                                   |
| Omfattning av skada i form av kostnad          | < 0,1 milj kr                                           | 0,1 – 1 milj kr                               | 1 – 5 milj kr                             | 5 – 20 milj kr                                   | > 20 milj kr                                   |
| Omfattning av skada genom kvalitativ värdering | Obetydlig skada på inventarier inga skador på byggnader | Lindrigare skada på inventarier och byggnader | Stora skador på inventarier och byggnader | Mycket stora skador på inventarier och byggnader | Total ödeläggelse av inventarier och byggnader |

Metodiken i denna rapport kräver dock att kostnadsparametern bryts ner ytterligare. Det räcker således inte att ange en totalkostnad för ett eventuellt fel. Underliggande parametrar, så som stilleståndstider och personalresurser, måste även klassas enligt tidigare.

Metodiken för denna klassificering genomförs genom att för alla tabellerade fel i tidigare skapad FMEA-analystabell ansätta ett värde, antingen 1 -5 eller via de andra listade parametrarna. För att i ett senare skede ytterligare kunna analysera indata bör värdena ansättas med dimensionerna kr, timmar och ggr/år.

Då det föreligger osäkerhet mellan två värden ska alltid det med högre sannolikhet och konsekvens användas (konservativ bedömning). Därefter rangordnas systemen efter produkten mellan sannolikheten och konsekvensen, enligt samma princip som för RPN, för att senare analyseras.

Då inte relevant information finns att tillgå för att kvantifiera tekniken får värden från andra liknande komponenter i liknande miljöer användas, eller på samma sätt som enligt kvantifieringen med RPN, genom erfarenhetsbaserade bedömningar.

#### 6.8.4 Kvantitativ bedömning

För att genomgående kunna bedöma sannolikheter och konsekvenser kvantitativt för de analyserade systemen, delsystemen eller komponenterna krävs tillgång till data vad gäller felsannolikheter, felstatistik eller sannolikheter.

Den efterfrågade informationen söks med fördel i egna databaser i första hand. Detta då reliabiliteten för data knuten till de olika teknikerna blir högre då exakta mätparametrar är kända. Vid inköp av extern data riskeras att information kommer från ej liknande komponenter använda i miljöer icke relevanta för just det specifika systemet.

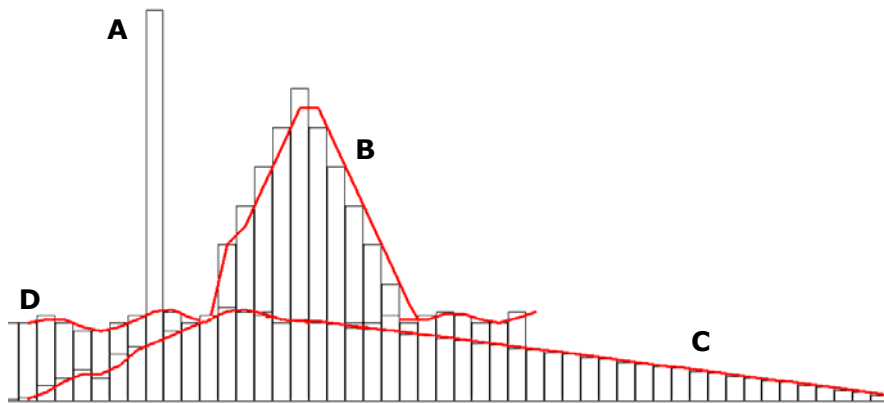
Använd följande rangordning vid inhämtning av driftinformation.

1. Data från tidigare komponenttester
2. Tillgängliga interna databaser
3. Externa databaser
4. Statistik från liknande system eller komponenter
5. Ingenjörsmässiga bedömningar hos personal med expertkunskap

Enligt tidigare ansätts värden för frekvens, sannolikhet och konsekvens i det tidigare skapade tabellarket. Riskerna i tekniken rangordnas efter produkten sannolikhet x konsekvens för att senare analyseras.

#### 6.8.5 Kvantitativ analys med osäkerheter

Om risken beskriver vilken sannolikhet och konsekvens en händelse har så beskriver osäkerheten vilken spridning utfallet kan anta. Ju större spridningen är desto osäkrare blir beslutsunderlaget. Om kvantifieringen enligt de tre tidigare angivna sätten inte hanterar osäkerheterna på ett tillfredställande sätt måste detta tas med i analysen. Hur osäkerheterna påverkar exempelvis nuvärdet illustreras nedan genom att visa hur fyra olika investeringar kan visa på samma förväntade nuvärde, men med helt olika osäkerhet



**Figur 11** Olika typer av osäkerhetesfördelningar.

Grafen visar fördelningar framtagna genom en integrering av alla händelsers sannolikheter och konsekvenser. A upplevs som helt befriad från osäkerheter, medan B, C och D innehar olika grader av osäkerhet. C och D är i sin tur mer riskfyllda system då de är förknippade med större spridning av osäkerheterna. Sannolikheten för att få ett sämre resultat än väntat är större, men också sannolikheten att få ett bättre. Vilken av investeringarna ovan som är bäst lämpad får avgöras från fall till fall. Grafen visar dock att det är viktigt att rapportera osäkerheterna enligt en fördelning istället för bara ett väntevärde (VF, 2008).

Att kvantifiera frekvenser, sannolikheter och konsekvenser för ny teknik med singulära värden kommer, i och med osäkerheterna, i de flesta fall innebära svårigheter. För att hantera osäkerheter enligt metoden för semikvantitativ eller kvantitativ bedömning kan båda metoderna kompletteras med att ansätta varianser. Detta görs genom att samtliga ansatta variabler skattas med ett max-, förväntat och ett minvärde.

Varianserna kan sedan med hjälp av simuleringsprogram (se kapitel 6.8) summeras ihop till en övergripande bild för hela tekniklösningen enligt figur 11. Exempel på vad som kan presenteras är väntevärden för kostnader, kapacitet eller nivåer av tillgänglighet.

## 6.9 Beräkningar

### 6.9.1 Singulära värden

Riskberäkning av indataparametrar av singulär typ görs med fördel enskilt för varje system, delsystem, undersystem eller komponent. Detta då gruppering av sannolikheter, frekvenser och konsekvenser på analyserat undersystem eller komponenter snart blir mycket komplext, samt att transparensen i analysen går förlorad. Risk tolkas nu som,  $\text{Risk} = \text{Sannolikhet} * \text{Konsekvens}$ . Alternativt då RPN används beräknas det ut enligt

$$R = P \times S \times D$$

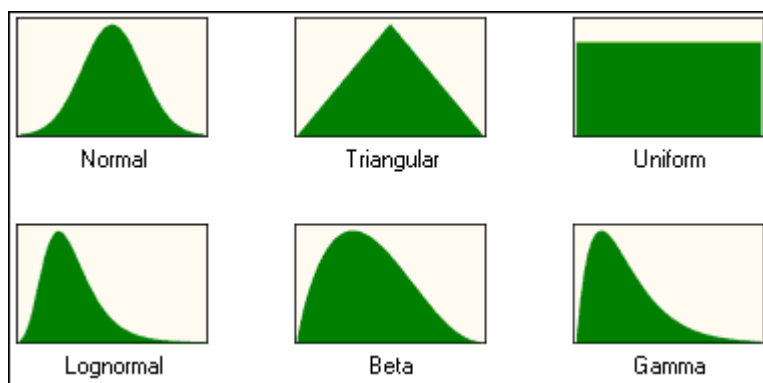
De beräknade riskvärdena rangordnas enligt tidigare i fallande ordning med tillhörande komponent. Vad denna analys nu visar är det system med störst risk i toppen av listan och systemet med rangordnad lägst risk i slutet av listan.

### 6.9.2 Beräkningar med osäkerheter

Beräkningar av system med ansatta varianser kräver i regel mer än beräkningar av system med ansatta singulära värden. Bortsett från då systemen är enklare och uppbyggda av enbart fåtal komponenter utan större spridning på värdena, kommer Monte Carlo-simuleringsprogram att vara till stor nytta i detta steg. I fallen med enklare system kan det vara mer effektivt att behandla osäkerheterna manuellt. Metoder för hur detta genomförs beskrivs närmare i exempelvis *System Reliability Theory* (Rausand, 2004).

Monte Carlo-simuleringar kan användas för att analysera komplexa system uppbyggda av flera olika delsystem med varierande spridning, där utfallskombinationerna blir alltför många för att effektivt kunna undersökas manuellt. Metodiken innebär att en dator slumpar ut tal i en ansatt fördelning för respektive variabel och beräknar resultatet utifrån det. Denna iteration upprepas tills ett totalresultat går att tolka genom ett fördelningsdiagram.

Proceduren för användaren är att för varje variabel anta en fördelning, ex normalfördelning, triangelfördelning etc. Fördelningarna ansätt utifrån tidigare framtagna min-, förväntat och maxvärden. För en del fördelningar kräver analysen att statistiska spridningsmått först beräknas. Exempel på fördelningar ses nedan i figur 12.



**Figur 12** Exempel på fördelningar

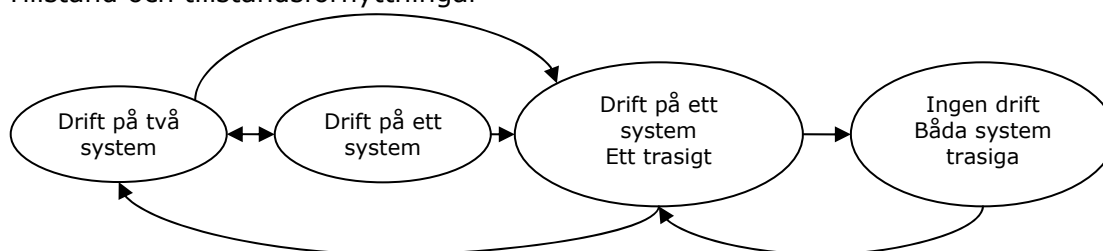
Det mest informativa simuleringsresultatet fås av att systemet byggs ihop genom att alla intressanta parametrar kopplas samman.

Beräkningsresultaten för simuleringar är inte av sådant slag att de bör redovisas med singulära värden varför hur dessa resultat ska tolkas beskrivs närmare under kapitel 6.9.

### 6.9.3 Tillståndsberäkningar – Parallella system, Redundans alt. Effektförsämring

Ett vanligt sätt att skydda beroende system från fel i överliggande system är att addera redundanser. Ett angreppssätt för att göra detta är att koppla in reserver i tekniken. I samband med addition av reserver adderas även olika tillstånd som tekniken kan befinna sig i. Exempelvis kan en teknik med en inkopplad reserv som redundans köras på det ena systemet, det andra, båda två eller på något av dem då det andra är trasigt eller under service. Se figur 13 nedan.

#### Tillstånd och tillståndsförflyttningar



**Figur 13** Exempel på tillstånd i ett system

På liknande sätt fås olika tillstånd då vi har parallella system eller tillstånd i system som kan resultera i olika konsekvenser. Genom tillståndsberäkningar går det att beräkna sannolikheten för hur ofta ett system befinner sig i var och ett av tillstånden, vilket i sin tur kan resultera i att exempelvis ökningen av tillgängligheten eller kapaciteten går att beräkna för redundanta system.

Som visas i figur 13 går det att förflytta sig mellan de olika tillstånden genom olika vägar. För att kunna genomföra en tillståndsberäkning krävs frekvenser för hur ofta ett system förväntas göra dessa förflyttningar mellan de olika tillstånden. Förtydligat innebär det exempelvis med hur stor frekvens systemet kommer att förflytta sig från tillståndet "Drift på ett system" till

”Drift på ett system Ett trasigt”, och så vidare för samtliga möjliga tillståndsförflyttningar.

Genom att använda kalkyleringsmetoder för markovprocesser (Rausand, 2004) går det att beräkna hur ofta och med vilken intensitet systemet förflyttar sig i tillståndsschemat. Enligt tidigare kan då värden för exempelvis tillgänglighet eller kapacitet för tekniken beräknas.

## 6.10 Analys av data

### 6.10.1 Teknikanalys av ansatta Singulära värden

#### Risk rankning

Den rangordning av risker som beskrivs i kapitel 6.8.1 ger en Risk rankning. Som tidigare beskrivet ska komponenter med högst risker läggas i topp på listan. Därefter rangordnas listan i fallande ordning efter riskvärdena. Vad denna lista nu visar är vilka komponenter i tekniken som förväntas bidra med störst kostnad, alternativt bidra till minskad tillgänglighet om det är den parametern som studeras.

#### Beräkning av kostnad per år samt tillgänglighet

Målet med detta steg är att knyta resultatet från beräkningarna till den kalkylmodell som användes i samband med den preliminära analysen. Därigenom går det att kontrollera och beräkna kostnaderna för tekniken. Detta steg är dock endast möjligt om fullt kvantitativa värden har blivit ansatta i kvantifieringssteget.

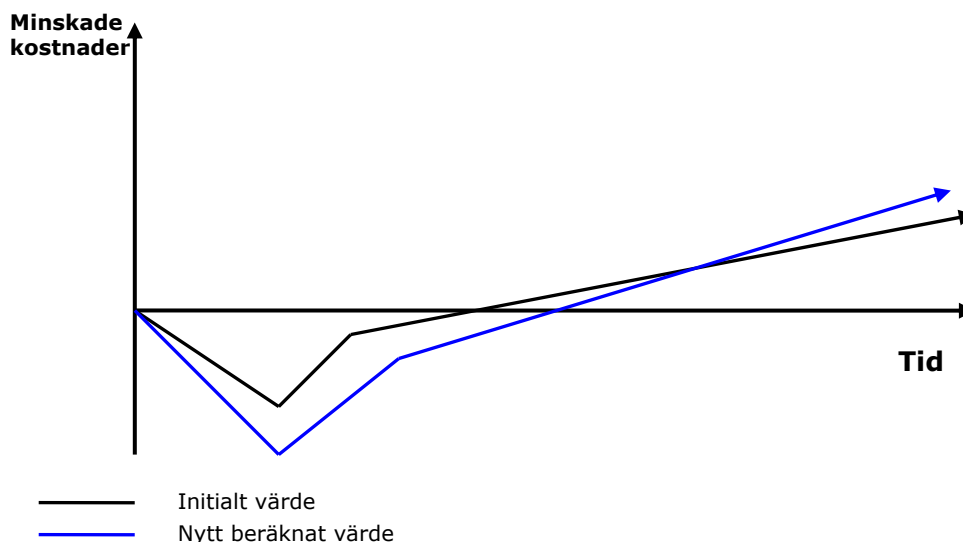
Figur 8 beskriver hur kostnaden per år är beroende av underliggande identifierade parametrar. Genom att för varje analyserat fel beräkna konsekvensen och addera förväntade kostnader och multiplicera dem med sannolikheten för att de inträffar under ett år, kan en förväntad total kostnad per år beräknas i enlighet med figur 8.

Utifrån de ansatta värdena för hur ofta tekniken förväntas haverera och hur lång stilleståndstiden blir för varje fel, kan en förväntad tillgänglighet beräknas på hela tekniken.

Det som nu har skapats är två viktiga mätparametrar, förväntad kostnad per år samt tillgänglighet. Dessa ska användas för att jämföra olika tekniklösningar med varandra, alternativt med nollalternativet.

#### Nuvärdesberäkning

Konsekvenserna för ett investeringsalternativ sträcker sig vanligtvis långt i tiden. Utbetalningar, avskrivningar och kostnader för service kommer att tillkomma under hela investeringens beräknade livslängd. För att kunna fatta ett investeringsbeslut är det dock av stor vikt att dessa kostnader åskådliggörs. Knyts därför de beräknade förväntade kostnaderna till en nulägesberäkning kommer troligtvis resultatet från den primära analysen att skilja sig från den framräknade av värden i FMEA:n. Detta illustreras i figur 14 nedan.



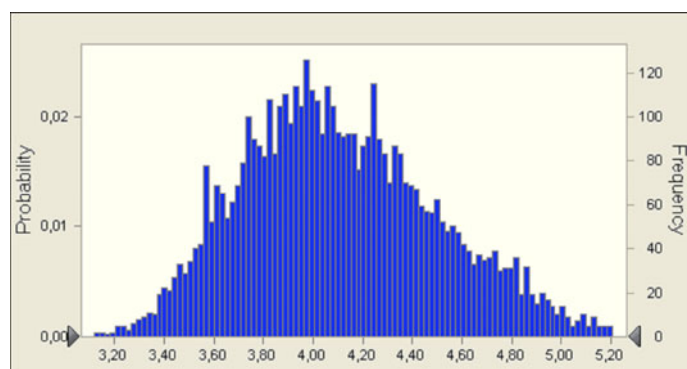
**Figur 14** Illustrativ beskrivning av nuvärdet för minskade kostnader före och efter metodikens genomgång

#### 6.10.2 Teknikanalys av ansatta värden med osäkerheter

Målet med detta steg, är precis som med singulära värden, att knyta resultatet från beräkningarna till den kalkylmodell som användes i samband med den preliminära analysen och därigenom kontrollera och beräkna kostnadsdrivande parametrar för tekniken. Skillnaden är att med hjälp av simuleringsprogram kan ett bättre beslutsunderlag skapas.

I förhållande till beräkningen av singulära tal kan simuleringsprogrammen med hjälp av Monte Carlo-simuleringar skapa fördelningsfunktioner och tillhörande täthets-/frekvensfunktioner för olika komponenter. Detta är i sin tur ett mer transparent analysunderlag där systemet och osäkerheterna knutna till de enskilda variablerna kan studeras utifrån ett systemperspektiv.

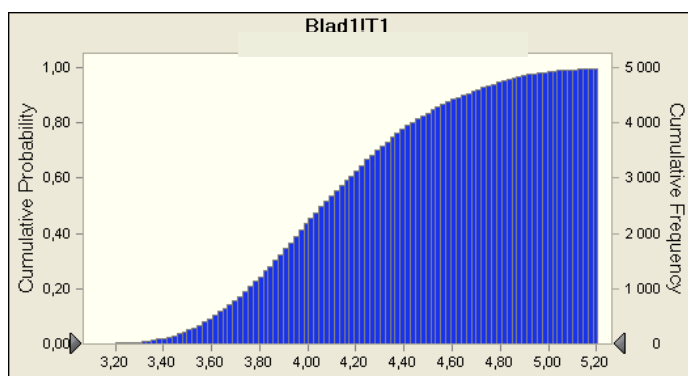
Beräknas totalkostnaden per år för en teknik kan exempelvis en fördelning av kostnaden liknande den i figur 15 framräknas av ett simuleringsprogram.



**Figur 15** Exempel på resultat från simulering

Figuren ovan visar att det här fallet är kostnaden 4 ett förväntat värde per år för tekniken. Detta då de flest slumpmässiga iterationer i simuleringen har givit det resultatet.

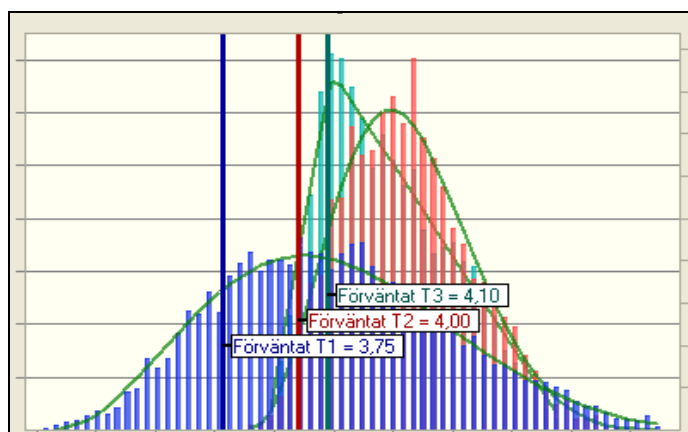
Formateras fördelningen om till en kumulativ fördelning enligt nedan skapas ytterligare information.



**Figur 16** Exempel på Kumulativ fördelning

Diagrammet visar att ett utfall lägre än ca 4,8 kommer att inträffa i ca 90 % av iterationerna. Detta kan tolkas som att ett resultat lägre än 4,8 är troligt med 90 % sannolikhet. På samma sätt visar diagrammet att det med samma säkerhet kommer vara över ca 3,6.

Om det finns flera alternativa tekniska lösningar att välja bland bör dessa jämföras på något sätt, t ex genom att låta varje alternativs kostnadsnuvärden (där kurvan visar täthets-/frekvensfunktionen för sitt alternativs totala nuvärdeskostnad) plottas i samma graf. Detta illustreras nedan i figur 17.



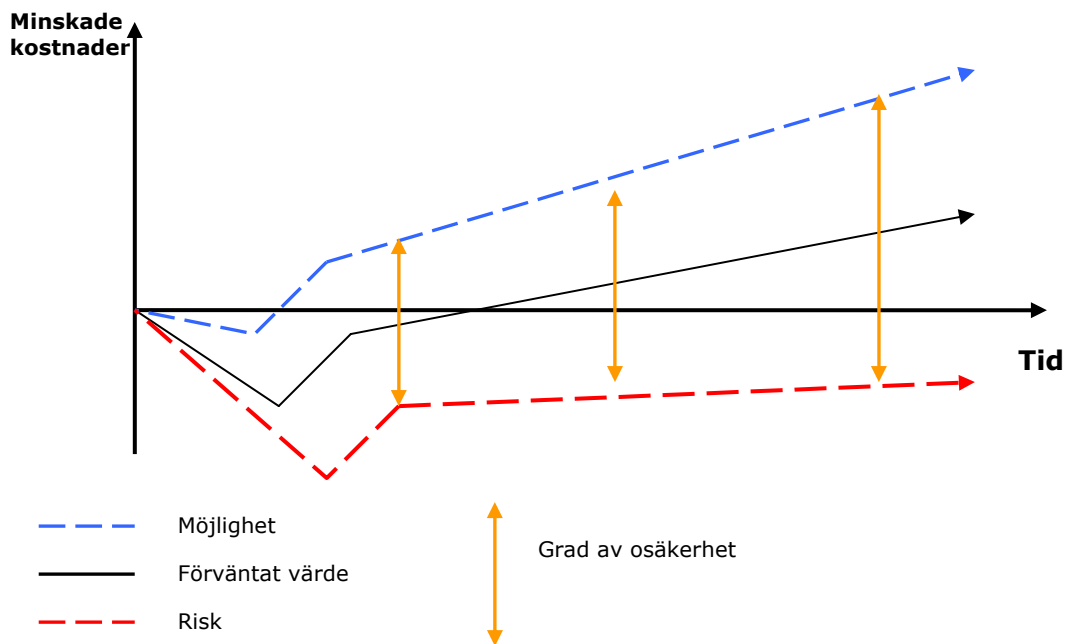
**Figur 17** Exempel på plot av tre olika tekniska lösningar

På samma sätt som i figur 15 går det även att skapa dessa plotter i kumulativ utformning.

### 6.10.3 Nuvärdesberäkning

Osäkerheterna i systemet kommer att variera över livslängden i den grad osäkerheter finns i använda indataparametrar. Det i sin tur leder till stora osäkerheter i eventuella nuvärdesberäkningar. Beräkning av nuvärdet samt en plot av det kommer därmed att skilja sig från den med singulära värden.

Genom skapa nuvärdesberäkningar kan spridningar för osäkerheterna åskådliggöras. Exempelvis för nuvärdesberäkningar är att i ett diagram plotta medelvärde, samt olika percentiler av det förväntade värde. I figur 18 nedan åskådliggörs hur detta kan se ut.



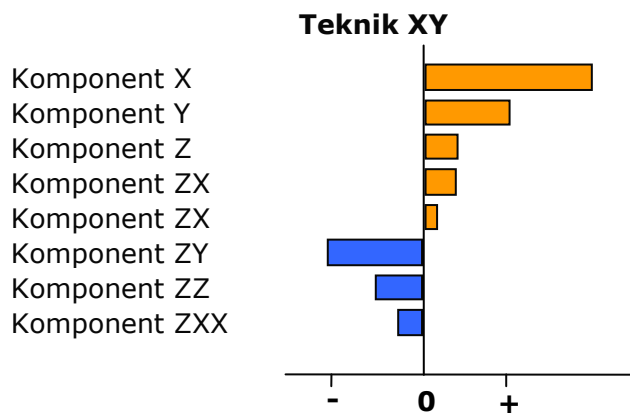
**Figur 18** Nuvärdesberäkningsplot med spridning från övre till undre gränsvärde

#### 6.10.4 Känslighetsanalys

Då de ansatta spridningarna i analysunderlaget medför osäkerheter är det av intresse för en beslutsfattare vilken/vilka av dessa osäkerheter som ger störst bidrag till variationerna i kalkylen. Denna typ av analys är därför av stort värde då det genom simuleringsprogram går att härleda var i systemet som åtgärder bör genomföras för att skapa säkrare data, genom till exempel komponenttester.

De program som använder sig av Monte Carlo-simuleringar klarar i de flesta fall även av att skapa känslighetsanalyser. Genom att systemet simuleras i sin helhet går det att beräkna hur enskilda system, delsystem eller komponenter påverkar osäkerheten i hela den analyserade tekniken. Det går till exempel att visa hur de totala osäkerheterna i de positiva eller negativa effekterna med ett system påverkas av varje enskild variabel eller komponent.

I figuren nedan ses exempelvis att "Komponent X" ger den största osäkerheten i positiva bidraget till driften av "Teknik XY" samtidigt som "Komponent ZY" resulterar i den största negativa osäkerheten.



**Figur 19** Schematisk bild av en känslighetsanalys

För mer information om denna typ av analys kontakta leverantör av Monte Carlo-simuleringsprogram.

#### 6.10.5 Sammanfattning av analysen

För att skapa en riskbaserad analys av ny teknik ger en indatamodell med singulära värden ett bra analysunderlag för att identifiera de komponenter som innehar störst risk. Denna analysmetodik av singulära värden gör det även möjligt att beräkna förväntade kostnader per år och hur dessa skulle kunna variera i och med att komponenter med hög risk förbättras. Analysen gör det även fullt möjligt att se hur de olika komponenternas risker påverkar nuvärdet. Vidare ger analysen även möjlighet att beräkna en förväntad tillgänglighet för systemet.

Genom att ansätta spridningsmått på de kostnadsdrivande parametrarna för att hantera osäkerheterna och simulera dessa värden skapas ytterligare viktigt beslutsunderlag. Enligt figur 11 riskerar de singulära värdena att ge en skev bild av tillgängligheten och kostnaderna för tekniken. Monte Carlo-simuleringsprogram ger möjlighet att studera teknikens kostnader och tillgänglighet i täthetsfunktioner, vilka ger en bra bild över fördelningen av osäkerheterna. Vidare kan spridningsmått skapas i nuvärdesberäkningar där övre och undre förväntade percentila gränser är plottade. Simuleringsprogrammen kan även skapa så kallade känslighetsanalyser, där de system eller komponenter som medför störst osäkerhet för tekniken kan urskiljas.

### 6.11 Designrevision

I och med en genomförd analys av den nya tekniken kan designlösningar med stora risker och osäker uppdagas. I de fall där osäkerheterna eller riskerna är för stora för att kunna accepteras återstår i princip två alternativ. Antingen att modifiera systemlösningen, eller att helt förkasta tekniken.

I de fall där valet är att försöka minska riskerna genom teknikmodifikationer bör genomförd analys användas för att kartlägga var i systemet som modifieringarna bör ske för att uppnå önskat resultat. Det går exempelvis att utgå från risk-rankningen för att se vilka komponenter som bör ersättas först

för att skapa en minskning av sannolikheten för höga kostnader eller lägre tillgänglighet.

## 6.12 Komponenttester

Ett sätt som används för att införskaffa säker kvantitativ driftdata för ny teknik är att genomföra komponenttester. Syftet med tekniken är således att bland annat att

- Erhålla kvantitativ driftdata till analysen
- Verifiera att analysmetoden har fungerat
- Verifiera funktionen
- Verifiera systemets tillgänglighet
- Kontrollera installation och underhållsmetoder

Komponenttesterna bör genomföras innan någon form av skarpa tester görs med tekniken inkopplad i elnätet.

Analysen av systemet bör i stor grad styra på vilka komponenter samt hur testerna ska genomföras och vilka parametrar som ska studeras. Bland annat bör kritiska komponenter som riskerar att orsaka stora kostnader testas. Vidare bör komponenter med större osäkerhet testas för att minimera dessa osäkerheter och på så sätt minimera osäkerheterna för hela tekniken.

Data som erhålls från komponenttesterna ska användas för att uppdatera indataparametrarna i analysen. Beslut om detta sker genom statistiska metoder för sannolikhetsuppdateringar till exempel bayesiansk uppdatering, eller om data från testerna används direkt i analysen får fattas från fall till fall och baseras på datahistoriken.

## 6.13 Uppdateringar och uppföljningar

Analysmodellen är tänkt att användas under hela livslängden för tekniken. Detta då säkrare data kan införas vartefter tekniken blir mer använd och kontinuerlig verklig driftdata för den nya tekniken kan infogas som analysunderlag.

Det är även av vikt att studera om feltillstånden inträffar med ansatt frekvens och om konsekvenserna blir enligt indataparametrarna. Skulle detta skilja sig är det av vikt att uppdatera analysen för noggrannare beräkningar efterhand.

## 7 Nackdelar med analysmodellen

Analysmetoden som beskrivs i denna rapport är bra på att hantera fel som drabbar hela systemet. Det uppstår dock svårigheter med komplexa system där korrelationer och interna beroenden ska analyseras. (IEC, 2006)

Uppskalning eller nedbrytning av frekvenser, sannolikheter och konsekvenser blir lätt missvisande i analysmodellen, varför det uppstår svårigheter då analysresultat ska tolkas om nedbrytningen inte skett på samma nivå. (IEC, 2006)

Analysmodellen är ineffektiv om den inte genomförs på rätt sätt. Vidare är objektiviteten något som alltför lätt åsidosätts då egna system analyseras, varpå analysresultatet riskerar att bli direkt missvisande. För att minska risken för detta bör en opartisk part leda analysarbetet.

## Referenser

Blanchard, B., (1998), *Logistics Engineering and Management*, 5:th Edition, ISBN 0-13-90505316-6

British standard, (1991), *Reliability of systems, equipment and components. Guide to failure modes, effects and criticality analysis (FMEA and FMECA)*, ISBN 0 580 19660 7

Carbon trust, (2005), *Guidelines on design and operation of wave energy converters*

Ehrstedt. T., (1997), *Handbok i riskanalys för värmekraftanläggningar*, Elforsk rapport 97:13B

Grimvall, G., Jacobsson, P., Thedéen, T., (2003), *Risker i tekniska system*, Isbn 91-44-02664-1 Studentlitteratur)

Hartford, D., Baecher, G., (2004), *Risk and uncertainty in dam safety*, Thomas telford, Isbn 07277 3267 6

Kylefors, M., Fredholm, L., Sandström, C., (2007), *Riskanalys lokalnät – kartläggning och reduktion av risker i elnät*, elforsk rapport 07:58,

FMV, (2006) ; *Handbok i Driftsäkerhet*, Försvarmakten, M7740-714001, Sörman information och media AB,

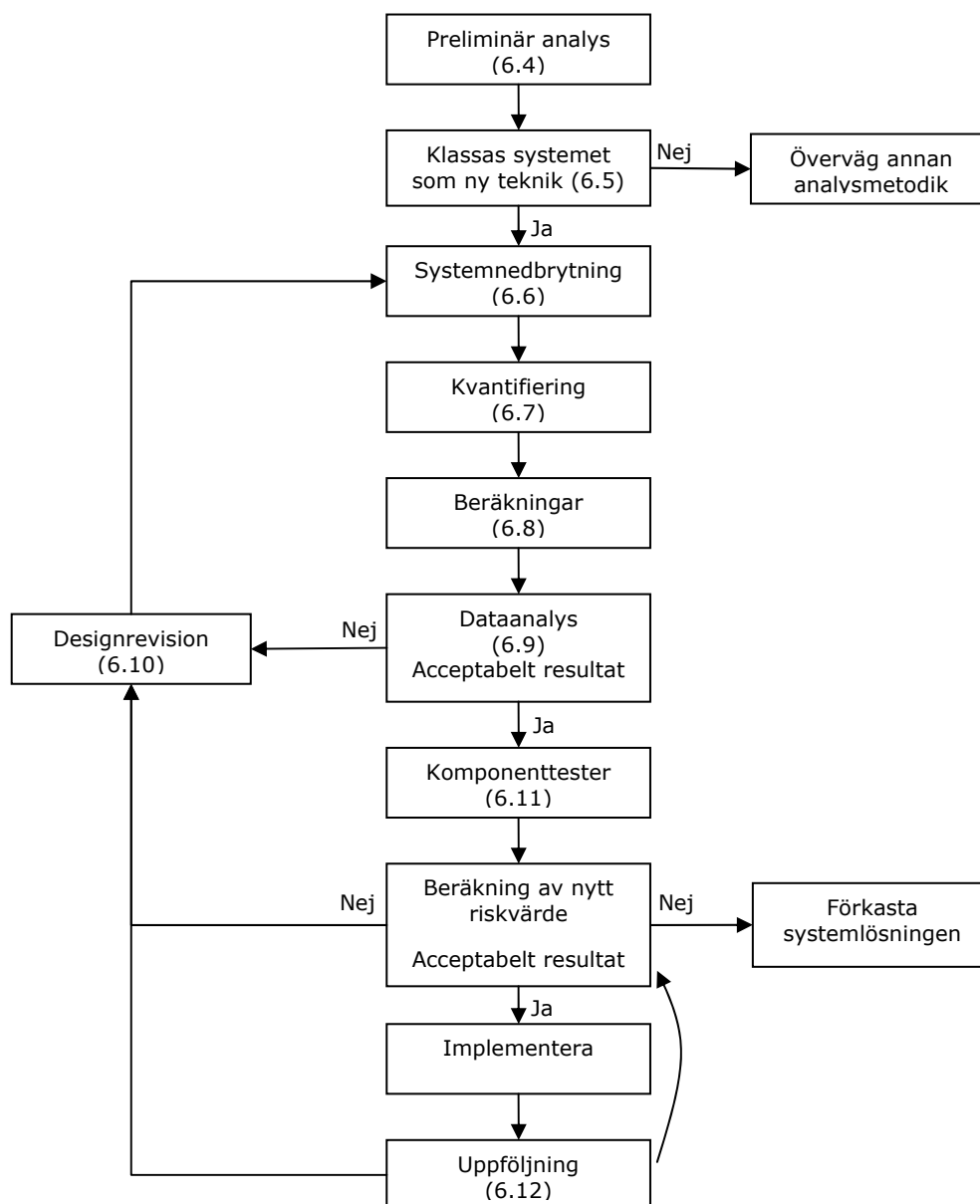
Moubray, J., (1997), *Reliability- Centered Maintenance*; Second edition, ISBN 0 7506 3358 1;Elsevier Butterworth-Heinemann]

Rausand. M., Høyland, A., (2004), *System Reliability Theory*, 2:nd edition, Wiley

Räddningsverket, (2003), *Handbok för riskanalys*, Göran Davidsson, Isbn 91-7253-178-9

VF, (2008), *Vattenfalls kalkylhandbok*

## Bilaga 1 Modell av analysmetodik



## Bilaga 2 Uppställning av preliminäranalys

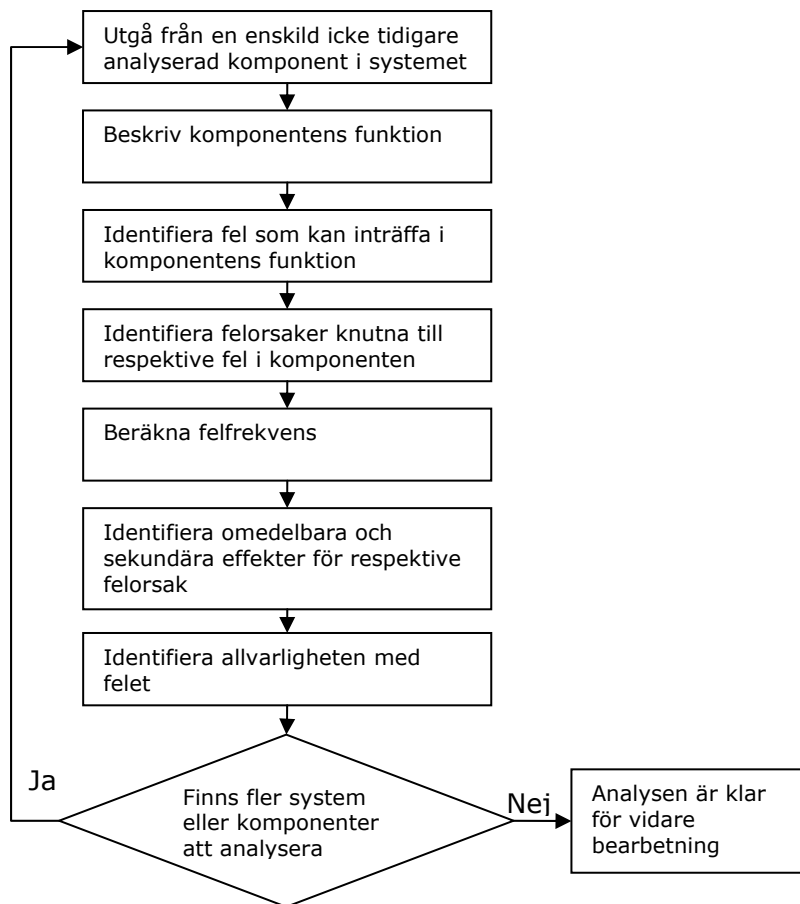
|                           |  |
|---------------------------|--|
| <b>Kostnadsparameter</b>  |  |
| Arbetskostnad             |  |
| Rörliga prod. kostnader   |  |
| Servicefordonskostnad/dag |  |
| Livslängd                 |  |
| Ränta                     |  |
| Annuitetsfaktor           |  |

| Komponent | Underhållskoncept | Antal installerat | MTBF / enhet (år) | Enhetspris (SEK) | Ersättnings/ utbytesenh. (% enhetspris) | Antal/ byte | Ställtid (dagar) | Väntetid (dagar) | Rep.tid (dagar) | Antal man per Rep. | Antal i reserv |
|-----------|-------------------|-------------------|-------------------|------------------|-----------------------------------------|-------------|------------------|------------------|-----------------|--------------------|----------------|
|           |                   |                   |                   |                  |                                         |             |                  |                  |                 |                    |                |

| Komponent | Antal Rep/år | Mantimmar per Rep. | Tillgänglighet | Stilleståndstid per enhet & år (timmar) | Installerat Värde (SEK) | Annuitet Installerat (SEK) |
|-----------|--------------|--------------------|----------------|-----------------------------------------|-------------------------|----------------------------|
|           |              |                    |                |                                         |                         |                            |

| Komponent | Rep.kostnad/år (SEK) | Transport/år (SEK) | Materiel/år (SEK) | Res.lager/år (SEK) | Summa (SEK) |
|-----------|----------------------|--------------------|-------------------|--------------------|-------------|
|           |                      |                    |                   |                    |             |

## Bilaga 3 Genomförande av komponentanalys



## Bilaga 4 Uppställning av komponentanalys

| Systemnedbrytning |                                  |                                            |                                       | Fel beskrivning         |                       |           |              |                                   |
|-------------------|----------------------------------|--------------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------|-----------------------|-----------|--------------|-----------------------------------|
| No                | System<br>Delsystem<br>Komponent | Funktion                                   | Antal<br>enheter<br>per<br>/delsystem | Funktionsfel            | Felorsak              | Feleffekt | Feldetektion | Reducerad kapacitet<br>[0 - 100%] |
| 1.0.1             | Brytare                          | Bryta<br>respektive<br>sluta<br>spänningen | 1                                     | Sluter ej<br>spänningen | Trasigt<br>manöverdon | ILE       |              | 100%                              |

| Konsekvens och sannolikhetsanalys |                 |      |                              |                 |      |                                          |                          |                 |      |                           |
|-----------------------------------|-----------------|------|------------------------------|-----------------|------|------------------------------------------|--------------------------|-----------------|------|---------------------------|
| Felfrekvens alt. felsannolikhet   |                 |      | Medel reparationstid (Dagar) |                 |      | Anal<br>personer<br>under<br>reparation. | Reservdelskostnad [kEUR] |                 |      | Antal enheter<br>i reserv |
| Låg                               | Förväntat värde | Högt | Låg                          | Förväntat värde | Högt |                                          | Låg                      | Förväntat värde | Högt |                           |
| X1                                | Y1              | Z1   | X2                           | Y2              | Z2   | 2                                        | X3                       | Y3              | Z3   | 0                         |

## Bilaga 5 Exemplifierat genomförande

Antagande: I ett fiktivt ställverk finns några gamla brytare som i samband med översyn eventuellt ska bytas ut.

Det ges möjlighet att i samband med översynen av brytarna byta ut dem mot nya obeprövade eller mot en liknande som redan är installerad. Ursprungsscenario ger därför totalt tre möjliga systemtekniska lösningar efter avslutad översyn.

- Teknik 1 (T1) De redan installerade brytarna lämnas oförändrade med vissa initiala reparation-/upprustningskostnader  
Beräknad livslängd 1 000 manövreringar
- Teknik 2 (T2) De installerade brytarna byts ut mot nya men identiska, som de befintliga.  
Beräknad livslängd 5 000 manövreringar
- Teknik 3 (T3) De installerade brytarna byts ut mot nya innehavande nya tekniska lösningar  
Beräknad livslängd 10 000 manövreringar

Genomförandet av en preliminär analys där variabler för övergripande värden på drift och underhållskostnader, tillgänglighet, investeringskostnader och internränta ansätts ger följande data för de tre fiktiva brytarsystemen.

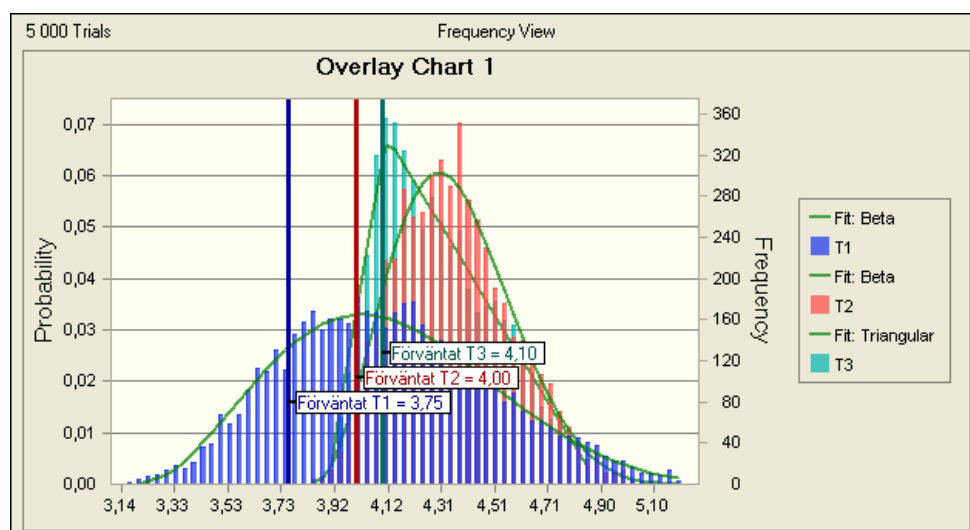
|           | <b>Drift och<br/>Uh-<br/>kostnader</b> | <b>Tillgänglighet</b> | <b>Investerings-<br/>kostnader</b> | <b>Internränta</b> | <b>Kostnad<br/>per år</b> |
|-----------|----------------------------------------|-----------------------|------------------------------------|--------------------|---------------------------|
|           | <b>XSEK/år</b>                         | <b>%</b>              | <b>YSEK/enhet</b>                  | <b>%</b>           | <b>XXSEK</b>              |
| <b>T1</b> | 2,5                                    | 95                    | 5                                  | 8                  | 3,75                      |
| <b>T2</b> | 0,5                                    | 99,0                  | 30                                 | 8                  | 4,0                       |
| <b>T3</b> | 0,125                                  | 99,7                  | 45                                 | 8                  | 4,12                      |

Enligt tidigare uppsatta krav och budget från inköparen uppfyller alla tre alternativen samtliga krav vad gäller tillgänglighet, tiden mellan fel, drift och underhållskostnader per år samt även investeringskostnader. Detta gör att det finns vidare behov av att genomföra en mer detaljerad analys av samtliga alternativ.

En sammanställning efter en nedbrytning av alternativen med ansatta spridningar för samtliga värden som innehåller osäkerheter skulle i ett verkligt skede kunna resultera i följande data.

|           |                  | Drift och<br>Uh-<br>kostnader | Tillgänglighet<br>per manöver | Investerings-<br>kostnader | Internränta |
|-----------|------------------|-------------------------------|-------------------------------|----------------------------|-------------|
|           |                  | Förväntat<br>XSEK/år          | %                             | YSEK/enhet                 | %           |
| <b>T1</b> | Max              | 3                             | 99,6                          | 10                         | 10          |
|           | <b>Förväntat</b> | <b>2,5</b>                    | <b>99,5</b>                   | <b>5</b>                   | <b>8</b>    |
|           | Min              | 2                             | 85                            | 4                          | 7,5         |
| <b>T2</b> | Max              | 0,7                           | 99,2                          | 35                         | 10          |
|           | <b>Förväntat</b> | <b>0,5</b>                    | <b>99,0</b>                   | <b>30</b>                  | <b>8</b>    |
|           | Min              | 0,45                          | 97                            | 29                         | 7,5         |
| <b>T3</b> | Max              | 0,13                          | 99,9                          | 45,1                       | 10          |
|           | <b>Förväntat</b> | <b>0,125</b>                  | <b>99,7</b>                   | <b>45</b>                  | <b>8</b>    |
|           | Min              | 0,05                          | 99,5                          | 44,9                       | 7,5         |

Simuleringsresultaten visar hur mycket de olika alternativens kostnadsfördelningar skiljer sig från de ursprungliga singulära förväntade värdena. Det går nu att utläsa att T3:s väntevärde avseende kostnader, vilket initialt utan systemnedbrytningen och simuleringar var högst, nu är nära det lägsta. Se figur nedan.



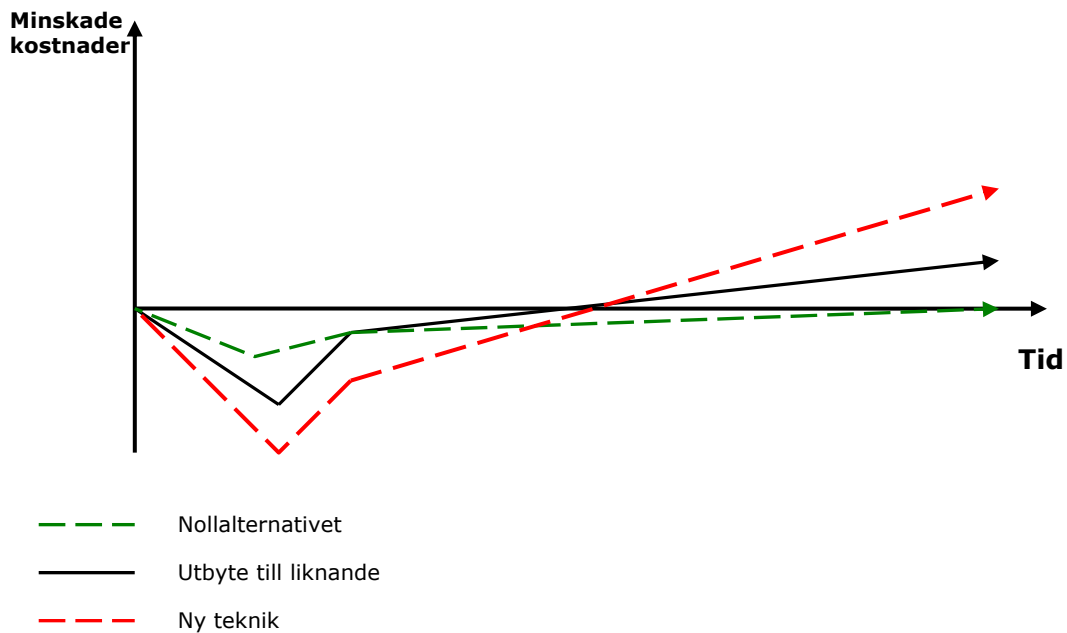
Vidare går det att skapa följande data.

|           | <b>Sannolikhet<br/>för att nå<br/>målvärde<br/>kostnader</b> | <b>Sannolikhet<br/>för att nå<br/>målvärde<br/>tillgänglighet</b> | <b>Sannolikhet<br/>att vara över<br/>99%<br/>tillgänglighet</b> | <b>95% övre<br/>percentil.</b> |
|-----------|--------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|--------------------------------|
|           | <b>%</b>                                                     | <b>%</b>                                                          | <b>%</b>                                                        | <b>XSEK</b>                    |
| <b>T1</b> | 17,84                                                        | 53,2                                                              | 7,78                                                            | <4,81                          |
| <b>T2</b> | 2,95                                                         | 9,0                                                               | 9,69                                                            | <4,73                          |
| <b>T3</b> | 19,24                                                        | 51,1                                                              | 99,99                                                           | <4,68                          |

Känslighetsanalysen visar hur stor del av osäkerheterna i resultatet som kan härledas till nyckelparametrarna.

| <b>Systemlösning</b> | <b>T1</b>             |           | <b>T2</b>             |           | <b>T3</b>   |           |
|----------------------|-----------------------|-----------|-----------------------|-----------|-------------|-----------|
|                      | Anskaffning           | 73,6<br>% | Anskaffning           | 55,1<br>% | Internränta | 99,2<br>% |
|                      | Drift och Uh<br>kost. | 25,6<br>% | Internränta           | 32,5<br>% |             |           |
|                      |                       |           | Drift och Uh<br>kost. | 12,2<br>% |             |           |

En nuvärdesanalys visar hur mycket kostnaderna skulle minska över tiden för de tre olika investeringsalternativen. Plottas exempelvis den 90 % percentilen för utfallen i ett diagram över tiden skulle en bild enligt nedan kunna fås. Graferna i diagrammet är enbart illustrativa och inte baserade på någon data.



### TOLKNING AV DE FIKTIVA RESULTATEN

Sammanställs resultatet ovan ges att det initialt billigaste alternativet T1 är det som med störst sannolikhet kommer vara det mest kostsamt under livslängden.

T1 är även det som innehåller störst osäkerheter i slutresultatet. Detta resultat skulle med andra ord vara det som ansetts billigast utan en riskanalys, men simuleringarna visar på motsatsen. I ett verkligt skede skulle denna analys därför troligtvis ha resulterat i stora kostnadsbesparingar.

T2, som enligt den första analysen visade på en relativt bra lösning ger vid en analys av tillgängligheten ett sämre resultat samtidigt som det visar sig vara mer kostsamt över tiden än system T3. Jämfört med T3 visar analysen även att det bara är 2 % sannolikhet att systemet kommer att kunna hålla budget beroende på mycket högre anskaffnings och driftkostnader.

Analysen har här kunnat påvisa flera faktorer som helt förbigåtts i en icke systemnedbrytande analys utan ansättning av spridning på variablerna.

T3 är det system som kommer att visa på lägst kostnad över året. T3 ger minst spridning av osäkerheterna, bäst tillgänglighet men även här en låg sannolikhet att nå budgeterad kostnad.

I fallet med båda nyinvesteringarna ses det att kostnaderna för båda är hårt bundna till variationen i internräntan varför T2 och T3 får svårare att hålla budget än T1.