

Ekonomiska konsekvensanalyser av komponenthaverier i kärnkraftverk

En metod för att systematiskt utvärdera
och rangordna ekonomiska konsekvenser

Christoffer Börefelt
Sophia Lundberg Fredriksson



UPPSALA
UNIVERSITET

Teknisk- naturvetenskaplig fakultet
UTH-enheten

Besöksadress:
Ångströmlaboratoriet
Lägerhyddsvägen 1
Hus 4, Plan 0

Postadress:
Box 536
751 21 Uppsala

Telefon:
018 – 471 30 03

Telefax:
018 – 471 30 00

Hemsida:
<http://www.teknat.uu.se/student>

Abstract

Ekonomiska konsekvensanalyser av komponenthaverier i
kärnkraftverk

Economic Consequence Analysis of Component Failure in Nuclear Power Plants

Christoffer Börefelt & Sophia Lundberg Fredriksson

Failure of components which are critical for production in nuclear power plants can cause extensive economic loss. This was demonstrated during late summer and autumn 2006 when three Swedish nuclear reactors was out of operation for more than a month, at a daily cost of eight million SEK for each reactor. To reduce interruption of production and increase availability, large investments in maintenance and new equipment are continuously being made. However, Swedish nuclear power plants lack a systematic tool for ranking and comparing components according to economic risk, which would be valuable for investment analysis. The aim of the thesis is to create a systematic model for calculating economic consequences of failure in components critical for production in Swedish nuclear power plants. For this purpose parameters that affect the economic consequence are identified and estimated. The model compares and sorts components according to economic consequences and ratios which make it possible to identify critical components prioritize between different investments and choose spare part strategy.

The model is applied on 24 components critical for production at Forsmarks Kraftgrupp AB. Our results from the case study show that relatively few input data enables comparison and sorting of components according to economic consequence and ratios.

Handledare: Tor Isdal, Vattenfall Power Consultant
Ämnesgranskare: Bengt Carlsson
Examinator: Elisabeth Andresdottir
ISSN: 1650-8319, UPTEC-STS07002
Sponsor: Pär Attermo, Vattenfall AB

Populärvetenskaplig sammanfattning

Bortfall av produktion är en stor ekonomisk risk för energiproducenter. Ett exempel på detta är incidenten på Forsmark i augusti 2006 som resulterade i att reaktorerna Forsmark 1 och 2 och Oskarshamn 1 och 2 var ur drift i en dryg månad. Oskarshamn 1 är i skrivande stund fortfarande ur drift. För varje dygn en reaktor är ur drift förloras åtta miljoner kronor i utebliven produktion. Vid de svenska kärnkraftverken läggs idag ett stort arbete ner på att minimera oplanerade stopp liknande detta.

Eftersom kärnteknisk verksamhet medför risk för strålning regleras en stor del av verksamheten av myndighetskrav från Statens Kärnkraftinspektion (SKI). De investeringar som görs i anläggningarna som följd av dessa beslut kan inte prioriteras bort utan är krav för att driva anläggningarna. För de delar av anläggningarna som inte är kritiska för reaktorsäkerheten utan endast påverkar elproduktionen, finns det däremot större beslutsfrihet vid nyinvesteringar eller underhållsprogram.

Målet med detta arbete är att konstruera ett verktyg som kan användas som stöd när olika investeringsbehov i produktionskritiska komponenter och system ska motiveras och prioriteras inbördes. Idag grundas beslut om strategier för nyinvesteringar eller underhållsprogram i erfarenhet. Det saknas emellertid ett verktyg för att systematiskt jämföra och rangordna komponenter mot varandra utifrån ekonomisk risk. Det verktyg vi presenterar i denna rapport är en metodik som kan användas för att systematiskt bestämma den ekonomiska konsekvensen vid komponenthaveri. Skattningar av komponenters haverisannolikhet kan adderas till modellen för beräkning av ekonomisk risk.

Metodiken och tillhörande beräkningsmodell har utvecklats genom en fallstudie av 24 komponenter vid Forsmark reaktor 1. Utifrån dessa har avgränsningar gjorts och ett antal kostnadselement valts ut. Stor vikt har lagts vid att informationsinsamlandet ska vara enkelt och frågeformuläret har liksom beräkningsmodellen förfinats genom intervjuer. Fallstudieresultatet av de 24 komponenterna visar som att komponenthaverier medför stora ekonomiska konsekvenser. Komponenter med hög ekonomisk konsekvens bör studeras närmare, exempelvis med avseende på haveriförebyggande och konsekvensreducerande åtgärder. Genom att rangordna komponenterna efter olika nyckeltal visas att Forsmarks lagerstrategi för strategiska reservdelar generellt är bra ur ett lönsamhetsperspektiv.

Förord

Detta examensarbete, som utfördes mellan september 2006 och januari 2007, sätter punkt för vår tid på civilingenjörsprogrammet System i teknik och samhälle vid Uppsala universitet. På samma sätt som vår tvärvetenskapliga utbildning, befinner sig det här arbetet i gränslandet mellan teknik och teknikens omgivande faktorer, här i form av ekonomiska variabler. Arbetet har inneburit en spännande utmaning med arbetssätt som till viss del skiljer sig från det vi är vana vid från universitet. Det har varit mycket lärorikt och inspirerande att arbeta ”ute i verkligheten” och vi har haft förmånen att genomföra vårt examensarbete på Vattenfall Power Consultant AB och Forsmarks Kraftgrupp AB.

Under arbetet har intervjuer och informanternas erfarenheter varit en väsentligt större informationskälla än teoretisk litteratur. Därför är alla de vi skulle vilja tacka här alltför många för att rymmas på sidan. Vi vill i alla fall rikta ett särskilt stort tack till ett antal personer som haft en avgörande betydelse för resultatet. Till att börja med vill vi tacka vår handledare Tor Isdal på Vattenfall Power Consultant AB som har ställt upp med många idéer, infallsvinklar och stort engagemang. På Forsmark har vi haft stor hjälp av Michael Jansson och Rolf Fernroth för att få inblick i organisationen och hitta rätt personer att prata med. Vi vill även tacka Pär Attermo och Martin Reinholdsson på PDM som varit delaktiga i att definiera uppgiften och sponsrat arbetet. Slutligen vill vi, förutom de ovan nämnda, tacka alla hjälpsamma människor på Forsmark och Vattenfall Power Consultant för att de tagit sig tid och visat intresse för arbetet. Varmt tack!

Uppsala, februari 2007

Christoffer Börefelt och Sophia Lundberg Fredriksson

Innehållsförteckning

1 Inledning	5
1.1 Syfte	5
1.2 Definitioner av begrepp	6
1.3 Omfattning och avgränsningar	6
1.4 Genomförande	7
1.5 Disposition	9
1.6 Bakgrund	10
2 Teorier kring riskanalys och riskhantering	12
2.1 Riskanalysprocessen	12
2.2 Riskanalysmetoder	14
2.3 Konsekvenser och konsekvensklasser	18
3 Urval av implementerade riskanalysmetoder inom Vattenfall AB	19
3.1 Hydra	19
3.2 Lillgrund och Uppsala block 5	20
3.3 Probabilistisk säkerhetsanalys (PSA)	21
4 En systematisk metodik för ekonomisk konsekvensanalys	23
4.1 Identifiering av komponent	23
4.2 Konsekvenskartläggning	25
4.3 Datainsamling	26
4.4 Beräkning med föreslagen modell	27
4.5 Analys av konsekvensresultat	28
4.6 Vidta åtgärder	31
4.7 Uppdatering	32
5 En modell för beräkning av ekonomisk konsekvens	34
5.1 Krav på beräkningsmodellen	34
5.2 Antaganden och förenklingar	35
5.3 Kostnadselement	37
5.4 Ekvationer för kostnadsberäkning	40
5.5 Operationalisering av parametrarna	43
6 Fallstudie på Forsmark	46
6.1 Urval av komponenter och avgränsning av studien	46
6.2 Värderna för globala parametrar	47
6.3 Resultat och analys av fallstudier	47
6.4 Känslighetsanalys	59
6.5 Osäkerhetsanalys i Crystal Ball	62
7 Diskussion kring metodik och modell	69
7.1 Jämförelse med Hydra	69
7.2 Hantering av osäkerheter	70
8 Slutsatser	72
8.1 Vidare arbete	72
Referenser	73

Muntliga källor	73
Tryckta källor	73
Internetbaserade källor	74
Bilaga A Data för analyserade komponenter	75
Bilaga B Beskrivning av system och komponenter för genomförda konsekvensanalyser	76
Bilaga C Frågeschema	79
Bilaga D Beräkningsmodellen i Excel	80
Bilaga E Kärnkraftverkets uppbyggnad	83
Bilaga F Definitioner	85
Bilaga G Redundans & Markovkedjor	87
Bilaga H Kategorisering av produktion	89
Bilaga I Reservdelstrategi och stipulerad risk utifrån stipulerat $MTBF_{ANL}$	90
Bilaga J PSA nivå 1- Risk för härdsador	92
Bilaga K Konsekvensklasserna illustrerade med Markovkedjor	93

Figurer och tabeller

Figur 1.1 – Uppdelning av riskbegreppet i olika kategorier.....	7
Figur 1.2 – Vår iterativa arbetsprocess.....	8
Figur 1.3 – Cirkeldiagram över Sveriges elproduktion år 2005.....	10
Figur 2.1 – Riskanalysprocessen.....	12
Figur 2.2 – Felträd med topphändelse, händelser, bashändelser, och-grind samt två eller-grindar.....	15
Figur 2.3 – Händelseträd med inledande händelse, händelsesekvenser samt konsekvensutfall.....	16
Figur 2.4 – Markovkedja med tillstånden E_1 och E_2 , felintensiteten λ och utbytesintensiteten μ	17
Figur 3.1 – Riskmatris.....	21
Figur 4.1 – Vår föreslagna metodik.....	23
Figur 4.2 – Komponent och delkomponenter.....	24
Figur 4.3 – Träd 1: Logistiktid.....	25
Figur 4.4 – Träd 2: Effektsänkning.....	26
Figur 4.5 – Konsekvensklasser.....	28
Tabell 4.1 – Parametervärden för nyckeltalsberäkning för 431-Generatorlager.....	30
Figur 5.1 – Rörliga och fasta kostnader.....	38
Figur 5.2 – Kategorisering av logistiktid och monteringsid.....	39
Tabell 6.1 – De tre inköpsalternativen med differenser vid konsekvens utan reservdel.....	49
Tabell 6.2 – Rangordning efter nuvarande konsekvens.....	50
Figur 6.1 – Nuvarande konsekvens.....	51
Tabell 6.3 – Rangordning efter konsekvens utan reservdel med konsekvensdifferens utan-med reservdel.....	52
Tabell 6.4 – Rangordning efter konsekvens med reservdel med konsekvensdifferens utan-med reservdel.....	52
Tabell 6.5 – Rangordning efter konsekvensökning per dygn för varje huvudkomponent där de fyra sista huvudkomponenterna är redundanta (effektsänkning för dessa är då redundansen inte är tillgänglig).....	53
Figur 6.2 – Konsekvensökning per dygn för varje huvudkomponent.....	53
Tabell 6.6 – Rangordning efter konsekvensreduktion per investerad krona.....	54
Figur 6.3 – Konsekvensreduktion per investerad krona för de tio komponenter som har störst konsekvensreduktion.....	55
Figur 6.4 – Konsekvens utan reservdel som funktion av inköpskostnad.....	56
Tabell 6.7 – Rangordning efter P_{BRYT} (reservdelsefterfrågan).....	57
Tabell 6.8 – Rangordning efter $MTBF_{BRYT}$	58
Tabell 6.9 – Utvalda parametrars känslighetsfaktorer.....	59
Figur 6.5 – Känslighetsdiagram 1.....	60
Figur 6.6 – Känslighetsdiagram 2.....	60
Figur 6.7 – Känslighetsdiagram 3.....	61
Figur 6.8 – Känslighetsdiagram 3 utan 612-Huvudtransformator och 612-Genomförning.....	62
Figur 6.9 – Känslighetsdiagram med de redundanta komponenterna.....	62
Figur 6.10 – Konsekvensensfördelning för 612-Huvudtransformator.....	64

Figur 6.11 – Känslighetsrangordning för 612-Huvudtransformator.	64
Figur 6.12 – Konsekvensensfördelning för 431-Generatorlager.	65
Figur 6.13 – Känslighetsrangordning för 431-Generatorlager.	65
Figur 6.14 – Konsekvensensfördelning för 415-Pumpmotor.	66
Figur 6.15 – Känslighetsrangordning för 415-Pumpmotor.	66
Tabell 6.10 – Procentuell skillnad i konsekvens beräknad direkt i beräkningsmodell respektive genom medelvärde av simuleringar med beräkningsmodell i Crystal Ball.	67
Tabell 6.11 – Procentuell skillnad mellan medelvärdet av simuleringar i Crystal Ball och den undre gränsen för ensidigt 95%-konfidensintervall ($[min; \infty]$).	67
Tabell 6.12 – Procentuell skillnad mellan medelvärdet av simuleringar i Crystal Ball och den undre gränsen för ensidigt 90%-konfidensintervall ($[min; \infty]$).	67
Figur A.1 – Data för alla i fallstudien ingående delkomponenter uppdelade efter respektive huvudkomponent.	75
Figur C.1 – Frågeschema.	79
Figur D.1 – Excelarket "Konsekvensmodell".	81
Figur D.2 – Excelarket "Nyckeltal".	82
Figur D.3 – Excelarket "Känslighet".	82
Figur E.1 – Kokvattenreaktor.	84
Figur G.1 – Redundant system med CCF.	87
Figur G.2 – Effekt av CCF.	88
Figur H.1 – Kategorisering av produktion.	89
Tabell I.1 – Reservdelsstrategi med stipulerad $MTBF_{ANL}$ på 500 år.	90
Tabell I.2 – Stipulerad risk.	91
Figur K.1 – Konsekvens 4: Ickeredundant komponent utan reservdel.	93
Figur K.2 – Konsekvens 3: Ickeredundant komponent med reservdel.	94
Figur K.3 – Konsekvens 2: Redundant komponent utan reservdel.	94
Figur K.4 – Konsekvens 1: Redundant komponent med reservdel.	95

1 Inledning

Vad ekonomiska risker i elproduktion i kärnkraftverk kan innebära illustrerades sensommaren och hösten 2006 då ett fel i Forsmark 1 i förlängningen ledde till att reaktorerna Forsmark 1 och 2 och Oskarshamn 1 och 2 stod stilla en dryg månad. Oskarshamn 1 står i skrivande stund fortfarande stilla. Ett exempel på hur enstaka komponenthaverier leder till stora produktionsbortfall är transformatorbranden på Ringhals 3 i november 2006 som medförde ett oplanerat stopp på nästan en månad. Dessa exempel medför för en reaktor på 1000 MW, såsom Forsmark 1 och 2, en förlust på åtta miljoner per dygn.

För att minimera oplanerade produktionsstopp i kärnkraftverk bedrivs ett intensivt arbete både med förebyggande underhåll av de komponenter som är i drift, samtidigt som stora summor investeras i nya system och komponenter som ska öka tillgänglighet och livslängd för anläggningarna. En del av nyinvesteringarna grundas i säkerhetskrav från Statens kärnkraftinspektion (SKI). Dessa investeringar kan kärnkraftverken inte prioritera mellan då de är ett krav för att få driva anläggningen. Prioritering och lönsamhetsanalys av investeringar inom kärnkraften är därför främst intressant för de investeringar som rör system och funktioner som är kritiska för produktionen.

Detta examensarbete är tänkt att vara en del av arbetet med investeringsplanering och är beställt av Investeringsplanering för Elproduktion Norden (PDM) inom Vattenfall AB. PDM analyserar och planerar investeringar som görs vid kärnkraftverken Forsmark och Ringhals som delvis ägs av Vattenfall. Kärnkraftverken identifierar investeringsbehov och förprojekterar investeringar (Isdal, 2006). PDM kommer in i ett senare skede när beslut om investeringen fattas.

Från PDM:s sida finns en önskan att kärnkraftverken:

- årligen rapporterar anläggningens status avseende driftsäkerhet genom att utreda sannolikhet och konsekvens för olika fel.
- tar fram en lista med de anläggningsdelar med störst ekonomisk risk.
- motiverar investeringar med en riskanalys där det tydligt framgår vad konsekvensen blir vid haveri om investeringen inte görs.

(Attermo, 2006)

I arbetet att utreda den ekonomiska risken för olika komponenter ingår att utreda sannolikheten för att ett fel ska inträffa samt den ekonomiska konsekvensen som felet orsakar, där den sistnämnda delen ingår i detta arbete.

1.1 Syfte

Syftet med examensarbetet är att ta fram en metodik för att utvärdera och rangordna konsekvenser vid fel i produktionskritiska system. Detta syfte kan brytas ner i de konkreta frågeställningarna:

- Hur ska metodiken utformas?
- Vilka kostnadselement ska ingå i beräkningen av den ekonomiska konsekvensen och hur ska dessa skattas?
- Utifrån vilka faktorer ska komponenterna rangordnas och vilka slutsatser kan dras utifrån resultaten?

1.2 Definitioner av begrepp

Anläggningsrisk: den ekonomiska risken en anläggning eller komponent är förknippad med, d.v.s. sannolikheten för ett fel och konsekvensen av det. Anläggningsrisk kan delas upp i produktionsbortfallskostnad, åtgärdandekostnad och tidigareläggandekostnad. Produktionsbortfallskostnad är den förlorade intäkten för försäljning av producerad vara. Åtgärdandekostnad består av kostnad för ersättningskomponent och monteringsarbete. Tidigareläggandekostnad är den extra kostnad som uppstår om en planerad investering måste genomföras tidigare p.g.a. komponenthaveri. (Isdal, 2006)

Haveri: Med begreppet haveri eller komponenthaveri menas i denna rapport att en komponent har förlorat sin funktion och inte kan repareras på plats eller i verkstad utan måste bytas ut.

Produktionskritiska komponenter: Ett kärnkraftverk består grovt sett av en reaktordel och en turbindel. De komponenter som hör till reaktordelen har olika säkerhetsuppgifter och driften av dessa säkerhetskritiska komponenter regleras av SKI. Turbindelen består av olika komponenter vars funktion är att producera el. Ett fel i den här delen av anläggningen slår i de allra flesta fall mot produktionen och inte reaktorsäkerheten. Därför benämns de i denna rapport som produktionskritiska. Investeringar och konstruktionslösningar i den produktionskritiska delen av anläggningen styrs till stora delar av kärnkraftverket självt.

Skilnad mellan reservdel finns i lager och reservdel tillgänglig: I rapporten skiljer vi mellan begreppen ”finns i lager” och är ”tillgänglig”. Om en reservdel finns i lager betyder det att ett aktivt beslut tagits att reservdelen ska lagerhållas. En komponent som finns i lager kan vara tillgänglig eller otillgänglig. Om den är tillgänglig fungerar den som den ska. Då den är otillgänglig går den inte att använda vilket kan bero på att den åldrats i lager, inte kan hittas p.g.a. administrativa problem eller inte har uppdaterats parallellt med uppdatering av anläggningen.

Strategiska reservdelar: komponenter som är dyra att köpa, har låg efterfrågan, lång tillverkningstid och leveranstid. Det är viktigt att inte ha onödigt många strategiska reservdelar i lager p.g.a. de kostnader som är förknippade med anskaffningsvärde och lagerhållning. Vid byggnationen köptes generellt reservdelar in eftersom kostnaden för ytterligare en komponent generellt är låg då tillverkningen pågår. (Lindgren, 2006)

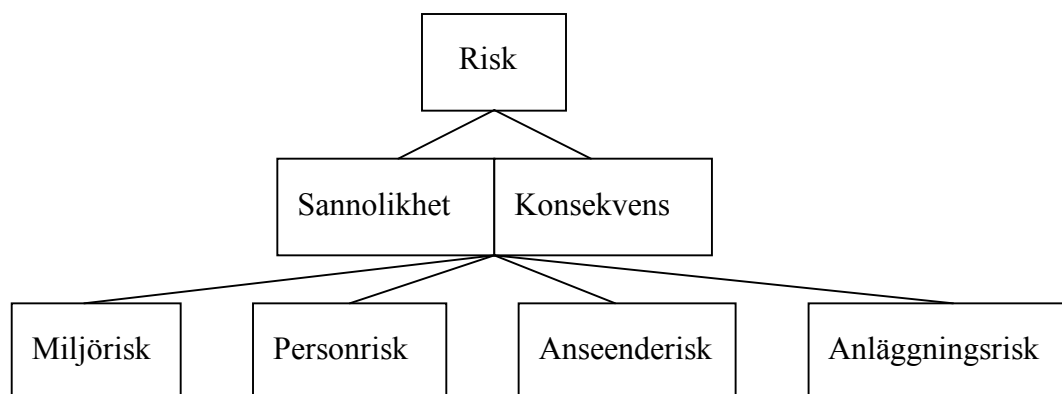
1.3 Omfattning och avgränsningar

Begreppet risk kan brytas ner på flera olika sätt, varav ett är anläggningsrisk, miljörisk, personrisk och anseenderisk (Isdal, 2006). Figur 1.1 åskådliggör denna uppdelning av riskbegreppet i olika kategorier. Den föreslagna metodiken är endast avsedd att utvärdera anläggningsrisk. Motivet till detta är att avgränsa arbetet eftersom en utvärdering av de andra kategorierna inte kan rymmas inom arbetets ramar.

Vidare studerar vi endast konsekvensen av ett haveri och inte sannolikheten att det inträffar. Detta för att det finns mycket lite data att tillgå för kvantifiering av haverisannolikhet. En metodik för att skatta haverisannolikhet eller bedöma anläggningens status ska kunna kopplas till konsekvensberäkningen för att ge ett värde på risken för olika komponenter. Eftersom metodiken inte innefattar sannolikhetsbedömningar för komponenthaveri faller dessutom frågeställningar kopplade till hur haverisannolikheten kan reduceras utanför arbetets ramar. Exempel på detta är förebyggande underhåll eller ökad övervakning på komponenter.

Syftet med att betrakta haverierna som irreparabla är att undvika det omfattande arbetet att studera olika felmoder och deras allvarlighet. Vid en sådan analys måste de olika sätt en komponent kan haverera på, samt konsekvensen det får, identifieras genom en så kallad Failure Mode and Effect Analysis (FMEA). Att i detta arbete endast studera haverier där komponenten måste bytas ut är alltså en viktig avgränsning för att hålla uppgiften på en rimlig nivå. Att endast irreparabla haverier analyseras är logiskt i hänseendet att det vid ett komponentfel bara ibland går att reparera komponenten men att valmöjligheten att helt byta ut den alltid finns.

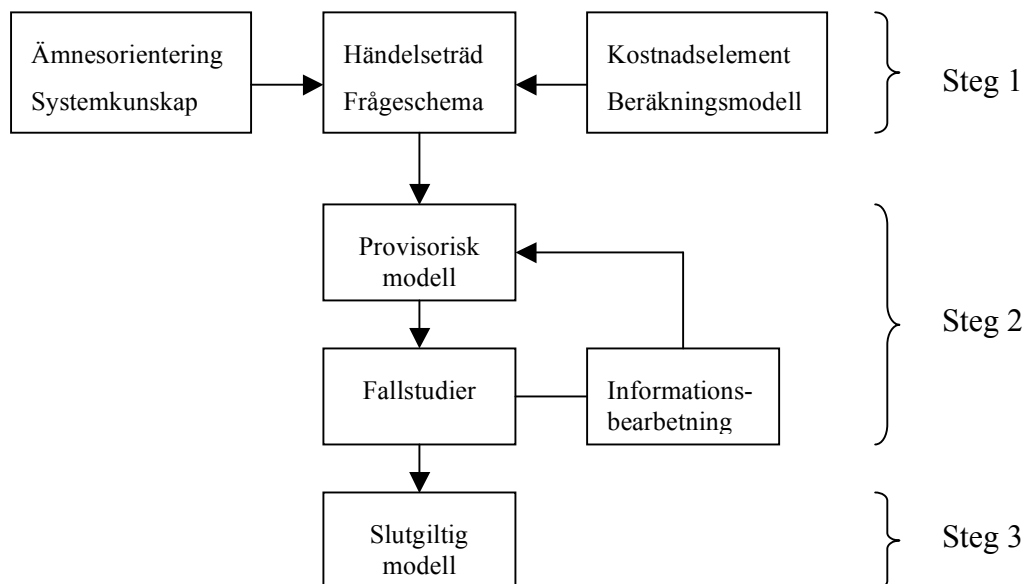
Som beskrivet ovan kan komponenterna i ett kärnkraftverk delas in i produktionskritiska och säkerhetskritiska komponenter, där det främst inom de produktionskritiska systemen lämnas spelrum att väga in ekonomisk nytta vid investeringar. En annan anledning till att titta på produktionskritiska komponenter är att enstaka komponenthaverier har ett tydligare genomslag i produktionen än säkerhetskritiska komponenter som ofta är redundanta. Gränsdragningen mellan produktionskritiska och säkerhetskritiska komponenter är inte alltid tydlig vilket stundtals försvårar urvalet av komponenter. Viktigt att poängtera är att alla säkerhetskritiska komponenter även är produktionskritiska men att det omvända inte gäller. Exempel på en säkerhetskritisk och produktionskritisk komponent är huvudtransformatorn som tillsammans med hjälptransformatorn ger redundant kraftmatning till olika hjälpsystem. Däremot är matarvattenpumparna produktionskritiska eftersom bortfall av matarvattnet endast leder till bortfall av produktion men inte utgör en säkerhetsrisk.



Figur 1.1 – Uppdelning av riskbegreppet i olika kategorier.

1.4 Genomförande

Målet vid utvecklandet av modellen har varit att med verkligheten som utgångspunkt härleda en modell baserad på erfarenheter från fallstudier. Det bedömdes som ett bättre och mer tidseffektivt tillvägagångssätt än att skapa en modell endast utifrån teoretiska studier, samtidigt som avsaknaden av tidigare forskning på området mer eller mindre tvingade oss att välja den vägen. Rent konkret har det inneburit att vi till att börja med konstruerade en provisorisk modell som sedan omarbetats i flera omgångar utifrån information som inhämtats när modellen tillämpats i fallstudier.



Figur 1.2 – Vår iterativa arbetsprocess.

Figur 1.2 illustrerar de olika stegen i arbetet. Arbetet i det första steget kan delas in i aktiviteterna: Införskaffande av systemkunskap och ämnesorientering, identifiering av kostnadselement och utformning av beräkningsmodell samt utredning av haveri-scenarier i händelsetradsform och konstruktion av intervjufrågor.

Ämnesorienteringen berörde hur vattenkraftens riskmodell Hydra är konstruerad och hur Forsmark och PDM idag arbetar med investeringar. Detta för att vi skulle kunna bilda oss en tydlig bild av nuläget och få en ökad problemförståelse. För att få en bredare kunskap om kärnkraft studerades utbildningsmaterial som används vid kurser som ges av Kärnkraftsäkerhet och Utbildning AB (KSU, 2005). Utifrån denna kunskapsbas identifierades olika konsekvensutfall av ett komponenthaveri i en händelsetradsstruktur.

För att identifiera möjliga parametrar att studera modellerades alla för oss tänkbara frågor som skulle kunna påverka den ekonomiska konsekvensen vid ett komponenthaveri. Exempel på frågor är "Finns reservdel i lager?", "Kan komponenten bytas under drift?", "Krävs effektsänkning?" samt "upptäcks haveriet under drift?". På detta idéstadium var fokus på att få med så många tänkbara frågor som möjligt och inte på att ställa frågorna i exakt rätt följd. Intervjufrågorna konstruerades utifrån händelsetradet och informella samtal med olika experter inom kärnkraft på Vattenfall Power Consultant (VPC). Frågorna sorterades under kategorierna "tid till återställd komponent" och "effektsänkning", då de kan ses som två oberoende parametrar. Denna uppdelning grundades i vår första kostnadsekvation som valdes utifrån teorier om anläggningsrisk (Isdal, 2006).

I steg två tillämpades modellen på tre huvudkomponenter. Som ett första fall valdes huvudtransformatorn efter diskussion med Michael Jansson (2006) på Forsmark block 1 (F1C) och Rolf Fernroth (2006) på Forsmark underhåll (FM). Detta ansågs vara ett bra första fall eftersom det inte är en redundant komponent samt att ett haveri i denna komponent direkt påverkar produktionen. Efter detta studerades huvudkylvattenpumparna som ansågs lämpliga då inte heller dessa är redundanta och där effektsänkningen beror av antalet pumpar som havererar. Som tredje fall valdes de redundanta matarvattenpumparna. Idén med att först göra ett par enklare fall var att bedöma vilka

frågor som har stor inverkan på den ekonomiska konsekvensen och vilka frågor som är mindre relevanta. Under fallstudierna grupperades frågorna enligt parametrarna logistiktid, monteringstid, effektsänkning, inköpskostnad och monteringskostnad. Hur frågorna ska utformas för att undvika missförstånd framgick också av fallstudierna. Vid de första fallstudierna utfördes djupintervjuer där syftet var att prova hur väl våra olika händelsesträdsscenarier överensstämde med verkligheten. Dessa intervjuer möjliggjorde en standardisering av frågorna där ett frågeschema kunde tas fram för att på så sätt möjliggöra en mer systematiserad metod. Vid en andra omgång fallstudier genomfördes ett antal intervjuer med frågemall för att prova hur väl dessa fungerade. I en sista runda skickades formulären ut via e-post för att prova om informationsinsamlingen är så enkel att den går att genomföra informationsinsamling via e-post. Michael Jansson och Rolf Fernroth hjälpte oss att välja ut lämpliga intervjupersoner.

I steg tre bestämdes slutligt hur modellen skulle se ut. Ett större antal fallstudier genomfördes och genom att analysera rangordningarna, känslighets- och osäkerhetsanalyserna så kunde slutsatser dras om hur olika parametrar påverkar resultatet och hur osäkra resultat modellen ger.

En fallstudie bör bedrivas enligt ett antal kriterier. Ett av dessa är god extern validitet, vilket innebär att slutsatserna ska kunna generaliseras bortom det utförda antalet fallstudier. För att åstadkomma detta har vi valt olika typer av komponenter inom den givna ramen. Vidare bör studien omfattas av god reliabilitet. Med detta menas att studien är replikerbar, d.v.s. att om någon annan skulle genomföra en undersökning på samma sätt och med samma material så ska liknande resultat och slutsatser kunna dras. Genom att tydligt dokumentera intervjuerna och övriga källor har vi försökt åstadkomma detta. (Wiederheim-Paul, 1999)

1.4.3 Analysverktyg för riskberäkningar

Vi har valt att använda Crystal Ball som analysverktyg vid osäkerhetsanalysen. Crystal Ball är ett riskanalysprogram som är integrerat i Excel och använder sig av Monte Carlo-simulering ur osäkerhetsfördelningar som modellens parametrar tilldelats. I början av examensarbetet var planen att använda Riskspectrum som är framtaget av Relcon AB. Detta program lämpar sig bra vid större probabilistiska säkerhetsanalysstudier (PSA) där system och olika systemberoenden modelleras samt då man behöver använda sig av olika beräkningsmetoder vid skattning av felmoder. Eftersom vi i denna studie inte beaktar haverisannolikhet upplevde vi att Riskspectrum inte passade vårt syfte. Genom Michael Jansson (2006) fick vi rådet att titta på @Risk som även det är ett integrerat program i Excel. Fördelen med @Risk framför Crystal Ball är att @Risk tillåter användaren att konstruera beslutsträd. Då det visade sig att det inte skulle vara någon fördel med att använda sig av beslutsträd framför vanliga Excelberäkningar i modellen föll till slut valet på Crystal Ball. Ett annat alternativt program är Fault Tree + som kan sägas vara en mer användarvänlig men inte lika kraftfull variant av Riskspectrum. Vi har använt Fault Tree + för att skapa händelseträdsillustrationer till rapporten. Då händelseträden vi använder är kvalitativa har Fault Tree + inte använts för beräkningar.

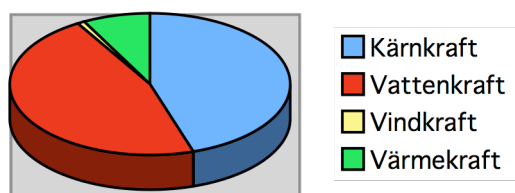
1.5 Disposition

Här presenteras rapportens kapitel kortfattat. Kapitel 2 och 3 beskriver olika metoder för riskanalys och riskhantering. De läsare som är bekanta med dem hänvisas direkt till kapitel 4.

- Kapitel 1 Inledning presenterar syftet med arbetet, definitioner av begrepp, omfattning och avgränsningar, genomförande samt en kort bakgrund beträffande elproduktionen, Vattenfall Power Consultant AB och Forsmarks Kraftgrupp AB.
- Kapitel 2 Teorier kring riskanalys och riskhantering tar upp relevanta teorier, exempelvis fel- och händelseträäd.
- Kapitel 3 Urval av implementerade riskanalysmetoder inom Vattenfall AB tar exempelvis upp det riskbaserade reinvesteringsverktyget Hydra.
- Kapitel 4 En systematisk metodik för ekonomisk konsekvensanalys beskriver hur relevanta komponenter kan identifieras, val av analysnivå, konsekvenskartläggning, datainsamling samt hur resultaten tolkas och analyseras.
- Kapitel 5 En modell för beräkning av ekonomisk konsekvens presenterar kostnadselement, kostnadsekvationen samt antaganden och förenklingar i modellen.
- Kapitel 6 Fallstudie på Forsmark redovisar och analyserar resultaten från fallstudien.
- Kapitel 7 Diskussion kring metodik och modell kopplar samman den genomförda fallstudien med vår metodik.
- Kapitel 8 Slutsatser sammanfattar de viktigaste slutsatserna och presenterar idéer till fortsatt arbete.

1.6 Bakgrund

Elproduktionen i Sverige domineras av kärnkraft och vattenkraft, som producerar 70 TWh respektive 72 TWh av den totala årliga elproduktionen 155 TWh. Vindkraften står för en liten andel med 0,6% av den totala årliga elproduktionen. Fossilbränslen och biobränslen stod år 2005 för 12,2 TWh eller motsvarande knappt 8% av den totala elproduktionen i Sverige. Detta åskådliggörs i figur 1.3 (Svensk energi, 2005).



Figur 1.3 – Cirkeldiagram över Sveriges elproduktion år 2005.

1.6.1 Vattenfall Power Consultant AB

Vattenfall Power Consultant AB (VPC) är Sveriges ledande energikonsultbolag med en omsättning på 633 MSEK och mer än 20% av den svenska marknaden år 2005. Företaget bildades 1976 som ett oberoende konsultbolag med Vattenfall AB som huvudägare. Företaget har totalt omkring 600 anställda. VPC har tio kontor i Sverige och arton kontor i övriga världen fördelade i Norden, Central- och Östeuropa, Afrika,

Asien och Latinamerika. Företaget har ett utbud för hela energibranschen inklusive produktion, elnät, miljö och management. Verksamheten är indelad i åtta samverkande affärsområden: Business Development, Elnät, Energi & Process, Infra-Anläggning, International, Kärnkraft, Vattenkraft samt Vindkraft. Detta examensarbete har utförts på Asset Management som är en del av affärsområdet Business Development. (VPC, 2006)

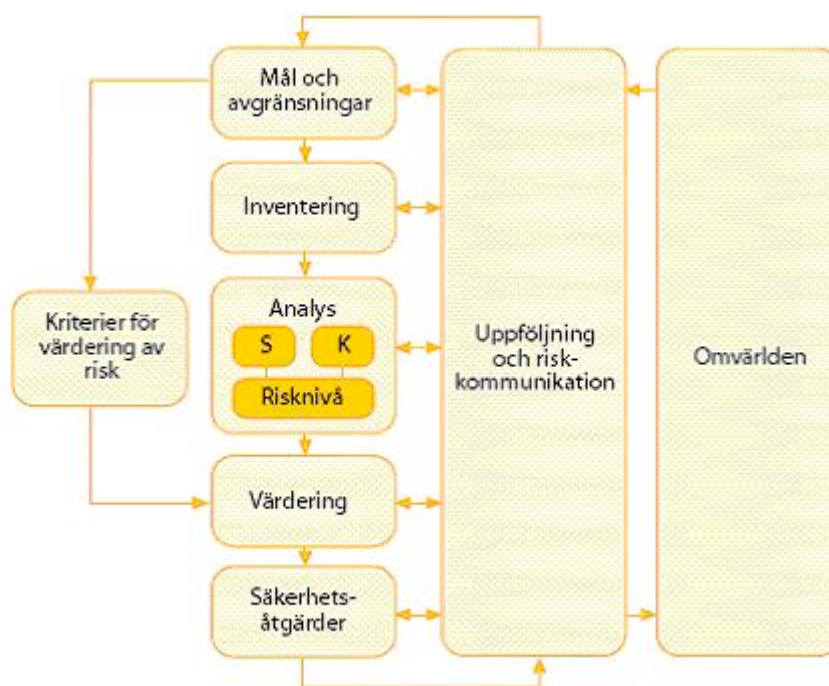
1.6.2 Forsmark Kraftgrupp AB

I Sverige finns det tio kärnkraftreaktorer uppdelade på tre anläggningar: Forsmark, Ringhals och Oskarshamn. Våra studier har utgått från Forsmark som ägs av Vattenfall AB med 66%, Mellansvensk kraftgrupp med 25.5% och Sydkraft med 8.5%. I Forsmark finns tre kokvattenreaktorer där den första stod klar för drift år 1980, den andra år 1981 och den tredje år 1985. Forsmark 1 (F1) och Forsmark 2 (F2) är tvillingreaktorer vilket innebär att de är näst intill identiska och därmed kan dela många reservdelar. Effekten på F1 och F2 är drygt 1000 MW och de har båda två parallella och identiska turbinstråk som försörjs med ånga av en reaktor. Med turbinstråk menas hög- och lågtrycksturbiner, generator samt kondensatsystem. Se bilaga E för en beskrivning hur de olika systemen fungerar tillsammans. Forsmark 3 (F3) har en effekt runt 1200 MW och ett turbinstråk. Normalproduktionen är på 23.5 TWh/år vilket motsvarar elförsörjningen av tre städer av Stockholms storlek under ett år eller mer än en sjundedel av den totala elproduktionen i Sverige. Energitillgängligheten för Forsmark har under de senaste åren varit hög, omkring 90% (KSU, 2006). Aktuella projekt inom Forsmark kan grovt delas upp i säkerhetshöjande åtgärder, yttre skydd, P40 och effekthöjningsprogrammet (Axelsson, 2006). Målet med P40 är att säkra en livslängd för anläggningen på 40 år, vilket är 15 år längre än den ursprungliga kalkylerade livslängden på 25 år. Inom effekthöjningsprogrammet investerar Forsmark 6 miljarder i allt från nya turbiner, ventiler och rörsystem till transformatorer, generatorer och ökad kylkapacitet. Målet med investeringarna är att höja den totala effekten i Forsmark med 410 MW vilket motsvarar en ökning av den årliga produktionen med 3,3 TWh. Forsmark har omkring 1000 anställda. (Forsmark, 2006)

2 Teorier kring riskanalys och riskhantering

2.1 Riskanalysprocessen

En riskanalys är en pusselbit i det övergripande, kontinuerliga arbetet med riskhantering. Riskhantering är en ständigt pågående process som innehåller delarna mål och avgränsningar med riskhanteringsarbetet, inventering av risker, bedömning av sannolikhet, konsekvens och risknivå, värdering av risker, genomförande av risk-reducerande åtgärder samt uppföljning och erfarenhetsåterföring. Se figur 2.1 för illustration av riskhanteringsprocessen. Riskhantering kan som arbetsmetod tillämpas på olika nivåer. Det kan röra sig om allt från övergripande frågor kring ett företags eller en stads trygghet och säkerhet till enskilda riskkällor. (Davidsson, 2003)



Figur 2.1 – Riskanalysprocessen (Davidsson, 2003).

Utifrån organisationens mål och föreskrifter utformas konkreta mål för riskanalysen. Tydliga mål gör analysarbetet mer effektivt och är viktiga för att analysen ska kunna utvärderas. Nästa steg, identifiering av risker, är viktig eftersom den bestämmer innehållet i analysen. I identifieringen bör erfarenheter från drift och olika expert-områden tas tillvara. Ett minimikrav för en heltäckande analys är att identifiera händelser som inträffat inom den egna verksamheten eller andra liknande verksamheter och andra uppenbara händelser med tanke på verksamhetens karaktär. Utöver detta bör även kombinationer av händelser och potentiella händelser vilka identifieras genom att säkerhetsfunktioner ifrågasätts, tas med. En metod för inventering av risker är Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) som beskrivs i kapitel 2.2.3.

För att bedöma de identifierade händelsernas sannolikhet kan tre tillvägagångssätt användas. Empiriska data över oönskade händelser (olyckor) kan användas som statistiskt underlag. Den förväntade sannolikheten eller frekvensen kan uppskattas genom jämförelser mellan den statistiska populationen och det studerade systemet. Ett annat tillvägagångssätt är att identifiera de händelserna som tillsammans eller enskilt leder till den oönskade händelsen. Sannolikheten för den oönskade händelsen beräknas m.h.a. sannolikheten för de ingående händelserna. En tredje och vanlig metod för att bedöma sannolikhet är att låta experter kvalitativt bedöma sannolikheten genom att välja en kategori enligt 1-5 eller ”osannolikt”-”mycket sannolikt”.

Bedömning av konsekvens innebär att effekterna av en oönskad händelse uppskattas. I kvantitativa studier uttrycks konsekvensen i jämförbara termer såsom antal skadade eller i ekonomiska termer. Skattningarna görs genom beräkningar som bygger på mer eller mindre teoretisk förståelse av effekterna. I kvalitativa analyser där det är svårt att sätta ett värde på en konsekvens görs ofta grova uppskattningar av experter analogt med kvalitativ skattning av sannolikhet.

När risker är identifierade och sannolikhet och konsekvens har skattats återstår att bedöma risknivån, hur sannolikhet och konsekvens ska sammanfogas samt hur resultaten presenteras. I en konsekvensorienterad resultatpresentation fokuseras på vilka konsekvenser som antas uppstå vid en oönskad händelse. De oönskade händelserna kan vara antingen värsta tänkbara händelse eller dimensionerad händelse. Den dimensionerade händelsen är den händelse med störst konsekvens som bedöms som möjlig med tanke på riskreducerande åtgärder som genomförts. Den dimensionerade händelsen ligger oftast till grund för planering av skadebegränsande åtgärder. Exempel på en riskorienterad resultatpresentation där sannolikhet och konsekvens vägs samman ges i kapitel 3.2 Lillgrund och Uppsala block 5.

För att beslut om eventuella riskreducerande åtgärder ska kunna fattas måste risken värderas. Detta kan i många fall öppna för en bred analys där enskilda individers och samhällsrepresentanters upplevelse av risken ställs mot nyttan som risken ger upphov till. Värdering av risker kan ske på individ-, organisations- eller samhällsnivå. Vid beslutsfattande kan kvantifierade risker omvandlas och rangordnas i kvalitativa kategorier för att risknivån ska kunna kommuniceras till allmänhet och beslutsfattare. I beslutsfattandet används ofta ett antal principer som utgångspunkt:

- Rimlighetsprincipen: Alla risker som kan åtgärdas med ekonomiskt eller tekniskt rimliga medel bör åtgärdas.
- Proportionalitetsprincipen: De risker som en verksamhet medför bör inte vara oproportionerligt stora i jämförelse med de fördelar den skapar.
- Fördelningsprincipen: Riskerna bör vara rimligt fördelade över samhället. En grupp av individer bör inte utsättas för oproportionerligt stora risker jämfört med de fördelar de får del av.
- Riskaversion: Risker som realiseras i stora katastrofer bör prioriteras framför risker som realiseras i mindre olyckor, även om den totala risken är lika hög. Det betyder att exempelvis en flygolycka med 100 döda anses allvarligare än 100 trafikolyckor med utfallet en död per olycka.

I det sista steget kan risken antingen elimineras genom att riskkällan tas bort eller reduceras genom att reducera sannolikheten för olyckan eller konsekvensen av den. Dessa alternativ kallas även olycksförebyggande, skadebegränsande eller konsekvensreducerande åtgärder. (Davidsson, 2003)

2.2 Riskanalysmetoder

Det finns många olika riskanalysmetoder som är utvecklade för analyser på olika nivåer. Vissa metoder lämpar sig för en första analys av ett system och andra metoder lämpar sig för detaljerade analyser av särskilda komponenter. Vid val av analysmetod är det viktigt att ta hänsyn till följande faktorer:

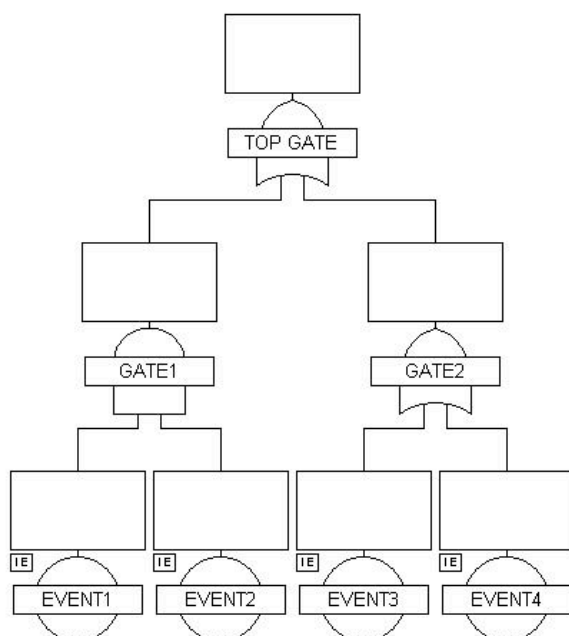
- Användbarhet: Resultaten ska uttryckas och presenteras så att målgruppen kan tolka och dra slutsatser av resultaten.
- Ekonomiskt incitament: Värde av att göra riskanalysen måste vara större än kostnaden att genomföra den.
- Trovärdighet: Osäkerhet i resultatet måste vara inom rimliga gränser.

Riskanalysmetoder kan delas in efter kvantifierbarhet i de tre kategorierna kvalitativa, halvkvalitativa och kvantitativa metoder. Kvalitativa metoder används främst för att identifiera olika risker. Till dessa hör grovanalyser, HazOp och What-If-analys. De halvkvantitativa analyserna graderar olika risker utifrån uppskattningar av sannolikhet kombinerat med konsekvens. Måtten för sannolikhet och konsekvens är ofta storleksordningar istället för siffror. Till dessa metoder hör riskmatriser och Failure Mode and Effect and Criticality Analysis (FMECA). De kvantitativa metoderna beskriver risker i kvantifierbara termer såsom sannolikhet för oönskad konsekvens, förväntat antal döda och förväntad ekonomisk skada. Probabilistiska kvantitativa metoder kombinerar sannolikhet och konsekvens till ett kvantifierbart riskmått. Deterministiska kvantitativa metoder är konsekvensanalyser där konsekvenserna av ett förlopp beräknas utan att sannolikheten för förloppet studeras. (Nystedt, 2000) Se ”Riskanalysmetoder” av Nystedt (2000) för ingående beskrivningar av olika riskanalysmetoder.

I avsnitten nedan beskrivs ett urval av de riskanalysmetoder som vi bedömer som relevanta för rapporten.

2.2.1 Felträd

Felträdsanalys är en s.k. top-down metod där utgångspunkten är en oönskad händelse som benämns topphändelse. Utifrån topphändelsen identifieras de bakomliggande händelsekedjor som leder fram till topphändelsen. Dessa kedjor kombineras i en trädstruktur, se figur 2.2, där logiska grindar används för att kombinera olika grenar. Vanligast förekommande är och-grindar och eller-grindar. En och-grind innebär att alla händelser under denna måste inträffa för att den aktuella händelsen ska inträffa medan en eller-grind innebär att någon av de nedanstående händelserna måste inträffa för att den aktuella händelsen ska inträffa. Början på varje gren är så kallade bashändelser som är de minsta beståndsdelarna i trädet och motsvarar felfunktionen i en komponent eller ett hjälpsystem. Metoden kan användas både kvalitativt och kvantitativt där en förutsättning för det senare är att felintensiteter för bashändelser och grenval i trädet går att kvantifiera. Styrkan med felträdsanalys är att den ger en överskådlig bild av beroenden i systemet och olika delhändelser som kan leda till topphändelsen. (Davidsson, 2003)

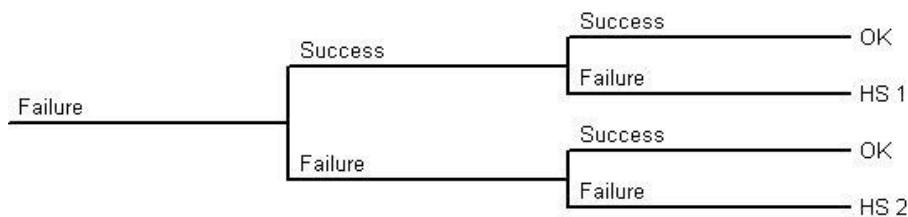


Figur 2.2 – Felträd med topphändelse, händelser, bashändelser, och-grind samt två eller-grindar.

2.2.2 Händelseträd

Händelseträdsanalys utgår, liksom felträdsanalys, från en oönskad händelse. I figur 2.3 illustreras ett händelseträd. Skillnaden är att istället för att som i felträdsanalys kartlägga bakgrunden till händelsen så utreds vilka konsekvenser som blir utfallet av den oönskade händelsen. Varje gren i händelseträdet grenar sig i två grenar som motsvarar att en händelse inträffar eller ej. Följden av händelser i händelseträdet motsvarar den logiska följden av olika möjliga händelser i ett verkligt scenario. Denna följd måste utredas genom identifiering av de olika händelser som kan inträffa och vilket beroende som finns mellan olika händelser. Denna följd av händelser skiljer händelseträdet från felträdet där olika händelser som leder fram till topphändelsen kan inträffa tidsmässigt åtskilda från varandra. Varje gren i händelseträdet är en enskild sekvens som leder till en konsekvens. Olika sekvenser kan dela samma konsekvens. Händelseträdsanalys kan genomföras både kvalitativt och kvantitativt beroende på om syftet är att kartlägga händelseförlopp eller studera sannolikheter för olika konsekvenser. (Davidsson, 2003)

EVENT1	EVENT2	EVENT3	Consequence
--------	--------	--------	-------------



Figur 2.3 – Händelseträd med inledande händelse, händelsesekvenser samt konsekvensutfall.

2.2.3 FMEA/FMECA

Failure Mode and Effect Analysis (FMEA), eller feleffektanalys, görs för att identifiera och förebygga olika kända eller möjliga fel i ett tekniskt system. Metoden innebär att experter systematiskt går igenom systemet, identifierar olika felmoder för en komponent eller olika fel på systemnivå samt hur dessa fel påverkar systemet. Vidare utreds också möjliga sätt att eliminera felen eller mildra effekten av dem. (Davidsson, 2003)

Nästa steg efter FMEA är att utreda hur kritiskt felet är. Detta görs genom en criticality analysis (CA) vilket sammantaget med FMEA blir en Failure mode, effect and criticality analysis (FMECA). I en CA rankas olika fel efter inflytande baserat på en kombination av sannolikhet och konsekvens. Sannolikheten att ett fel inträffar kvantifieras genom att det klassificeras utifrån en logaritmisk skala med olika kvalitativa sannolikhetsklasser kopplade till varje intervall (från frekvent till väldigt osannolikt). Konsekvensen kvantifieras inte utan bedöms enligt en rent kvalitativ skala med olika konsekvensklasser. För att sedan bestämma ett systems kriticitetstal så räknas antalet systemfel per konsekvensklass orsakade av en systemkomponents felmod över en viss tid. Till slut beräknas varje komponents allvarlighetsnivå genom att summera kriticitetstalen för varje felmod hos komponenten.

Genom att ranka komponenterna utifrån kriticitetstal så kan slutsatser dras om:

- Vilka komponenter som bör studeras vidare.
- Vilka komponenter som ska övervakas extra under produktion.
- Vilka speciella krav som ska ställas på leverantören vad gäller design, prestanda, tillförlitlighet, säkerhet eller kvalitetsnivå.
- Vilka prioriteringar av investeringar i olycksförberedande arbete som bör göras.

(Kumamoto, 1996)

2.2.4 Markovkedja

En Markovkedja är en tidskontinuerlig och tillståndsdiskret sannolikhetsmodell. Den beskriver olika tillstånd och beräknar sannolikheter för att gå från ett tillstånd till ett annat. Antalet tillstånd måste vara två eller fler. En Markovkedja ger svar på frågorna:

- Givet att systemet som ämnas undersökas befinner sig i ett tillstånd, vad är sannolikheten att det kommer att stanna kvar i detta tillstånd?

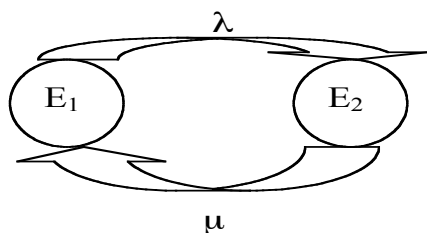
- Givet att systemet som ämnas undersökas befinner sig i ett tillstånd, vad är sannolikheten att det kommer att gå över i något av de andra tillstånden?
- Vad är den förväntade tiden i varje tillstånd?

En Markovkedja används för att analysera system som kan anta olika tillstånd, det allra enklaste exemplet är ett system med två tillstånd. Den börjar med att det system som ska analyseras identifieras. Nästa steg är att identifiera systemets tillstånd, exempelvis ett dikotomt¹ system med de två tillstånden E_1 och E_2 . Sedan analyseras flödet mellan tillstånden, det vill säga övergångssannolikheterna för att gå från tillstånd E_1 till E_2 och E_2 till E_1 . Sannolikheten att stanna kvar i det tillstånd systemet befinner sig i plus sannolikheten att gå över i ett annat tillstånd ska alltid vara lika med ett. Efter detta kan den förväntade tiden i varje tillstånd beräknas. (Blom, 1984)

Ett exempel som passar bra in i sammanhanget och som illustreras i figur 2.4 är ett ickeredundant dikotomt system med tillstånden E_1 =systemet fungerar och E_2 =systemet fungerar inte. Givet att systemet befinner sig i E_1 så kommer det att haverera och övergå i E_2 med felintensiteten λ . Givet att systemet inte fungerar så kommer systemet att bytas ut och övergå i E_1 med utbytessintensiteten μ . Utifrån detta kan den förväntade tiden i E_1 och E_2 beräknas. Den förväntade tiden till att systemet havererar ges av Mean Time Between Failure (MTBF) och den förväntade tiden tills systemet har byts ut och fungerar igen ges av Mean Down Time (MDT). Sambandet mellan λ och MTBF samt μ och MDT ges av:

$$\lambda = \frac{1}{MTBF}, \text{ vilket ger den förväntade tiden i } E_1: MTBF = \frac{1}{\lambda}.$$

$$\mu = \frac{1}{MDT}, \text{ vilket ger den förväntade tiden i } E_2: MDT = \frac{1}{\mu}.$$



Figur 2.4 – Markovkedja med tillstånden E_1 och E_2 , felintensiteten λ och utbytessintensiteten μ .

2.2.5 Monte Carlo-simulering

Monte Carlo-simulering används för att undersöka hur olika parameterosäkerheter påverkar modellresultatet. Det är den äldsta och mest välkända numeriska metod som används idag. Vid en Monte Carlo-simulering väljs ett slumpmässigt punktvärde ur varje parameterfördelning (en s.k. dragning) för att sedan processas i modellen. Varje

¹ Med ett dikotomt system menas ett system som endast kan befinna sig i något av tillstånden "fungerar" eller "fungerar inte". Systemet har inga andra felmoder utan kan bara befinna sig i något av dessa två tillstånd.

dragningsprocess kan exempelvis utgå från respektive parameters kumulativa fördelningsfunktion (CDF-kurva) som beskriver sannolikheten för att värdet på variabeln A är mindre än eller lika med x.

$$F(x) = P(A \leq x)$$

F(x) antar värden mellan 0 och 1. Funktionen $G(F(x))=x$ beskriver vilket värde F(x) antar för ett givet värde på x. Ett slumpmässigt tal, r, mellan 0 och 1 genereras ur en fördelning och resulterar i en slumpmässig dragning. Proceduren upprepas för samtliga parametrar med fördelningar och deras respektive slutprodukt beräknas. Ett antal olika punktvärden för slutprodukten räknas fram genom att flera simuleringar görs. Dessa är alla beroende av de specifika dragningar som gjorts ur fördelningarna. De olika punktvärdena beskriver spridningen eller variationen i slutprodukten och visas med en CDF-kurva. Ju fler simuleringar som görs desto mindre osäkerheter i den framtagna CDF-kurvan. (Abrahamsson, 2002)

2.3 Konsekvenser och konsekvensklasser

Generellt vid riskanalysarbete delas konsekvenser in i grupperna miljö, person och anläggning. Oftast är det mer intressant att inbördes kunna rangordna olika konsekvenser än att exakt kvantifiera dem. Därför delas ofta konsekvenser in i olika konsekvensklasser enligt en skala från små till katastrofala skador på miljö, person och anläggning. Dessa konsekvensklasser kan definieras utifrån de preferenser som finns angående hur allvarlig en konsekvens kan vara för att motivera förebyggande åtgärder.

Eftersom de flesta konsekvenserna inte kvantifieras är det svårt att på ett bra sätt ranka totala risker i olika anläggningar eller för olika komponenter. Om ett totalt riskmått ska beräknas utifrån olika konsekvenser för miljö, person och anläggning så måste dessa viktas mot varandra på något sätt. Enklast är då att prioritera en konsekvensklass före de andra och ranka olika risker utifrån denna. (Larsson, 2005)

3 Urval av implementerade riskanalyismetoder inom Vattenfall AB

I alla större projekt inom Vattenfall utförs regelmässiga riskanalyser (Attermo, 2006). Riskanalyserna genomförs för att Vattenfall ska kunna fatta välgrundade och strategiska beslut.

3.1 Hydra

Hydra (Hydro Powerplant Risk Analysis) är en metod för att bedöma och rangordna vattenkraftanläggningar som används inom Vattenfall Vattenkraft AB. Metoden är utvecklad av Syntell AB år 2001 för Vattenfalls räkning i nära samarbete med specialister inom Vattenfall. Syftet med Hydra är att vara en beslutsstödsmodell vid prioritering och urval av vilka anläggningar som bör genomgå någon form av förnyelse eller upprustning. (Andreasson, 2001)

3.1.1 Modellstruktur

Hydra beräknar risknivåer för miljörisk, anseenderisk, personrisk samt anläggningsrisk. Sannolikheterna för en önskad händelse klassas enligt en av tio frekvensklasser utifrån expertbedömningar av erfaren personal. Frekvensklasserna går från ”mindre än en gång per 100 000 år” till ”mer än en gång per år”. De olika kostnadstyperna delas in i olika allvarlighetsklasser där varje sådan klass motsvarar ett intervall. Varje intervall får sedan ett beräkningsvärde. Anläggningsrisk mäts med en monetär enhet medan de övriga tre riskkategorierna anges i en dimensionslös enhet. Anläggningsförutsättningarna klassas utifrån alternativen ”bra” respektive ”dålig”, där kriterier finns uppställda för vad som benämns som dåligt respektive bra.

Anläggningsrisken bestäms av sannolikheten för att en ekonomisk skada uppstår samt storleken på den ekonomiska skadan. Storleken bestäms i sin tur av två komponenter: stilleståndskostnaden som är den kostnad som utebliven produktion innebär och åtgärdandekostnad som är den kostnad som det innebär att återställa produktionsapparaten till funktionellt skick. Stilleståndskostnaden beräknas exakt genom att multiplicera produktionsbortfallskostnaden med stilleståndstiden och dividera den summan med 365. Stilleståndstiden uppskattas av experter och består av åtta allvarlighetsklasser som går från ett dygn till mer än ett år. Åtgärdandekostnaden delas in i nio allvarlighetsklasser som spänner från mindre än 50 kSEK till mer än 100 MSEK.

Miljörisk innebär en bedömning på hur säker en anläggning eller anläggningsdel är för den omkringliggande miljön. Den bestäms av sannolikheten för att en miljöskada uppstår och allvarligheten på miljöskadan. Allvarligheten på miljöskadan delas in i fyra klasser: obetydlig miljöskada, mindre miljöskada, omfattande miljöskada samt mycket allvarlig miljöskada.

Anseenderisk bestäms utifrån sannolikheten för att en anseendeskada uppstår och storleken på anseendeskadan, vilken i sin tur bestäms av de sju faktorerna: skada på omgivning såsom bebyggelse och infrastruktur, grad av utebliven produktion, grad av personskada, grad av miljöskada, exponeringstid i media, räckvidd av medierapportering samt betydelsefaktor mellan skadeområden omgivningsskada, personskada, utebliven miljöproduktion och miljöskada.

Personrisk bestäms av sannolikheten för att en personskada uppstår och personskadans allvarlighet. Fyra allvarlighetsklasser för personskada används: obetydlig personskada, mindre allvarlig personskada, allvarlig personskada samt dödsfall. (Andreasson, 2001)

3.1.2 Modellresultaten

Hydra tar fram en tio-i-topp lista över investeringar efter att ha tagit hänsyn till sannolikheten och konsekvensen av ett haveri. De beräknade riskvärdena bör användas för jämförelser snarare än att ses som absoluta belopp. Fördelarna med modellen är att den möjliggör en populationsjämförande riskanalys. En annan styrka är att samtliga Vattenfalls vattenkraftsanläggningar är inkluderade. Nackdelarna med Hydra är att den inte tar fram absoluta värden för risknivåerna på grund av två faktorer. Den ena är osäkerheter i analysen som är av översiktlig karaktär baserad på information framtagen med kvalitativa metoder. Den andra är att den eventuella risken som den operativa driften belastar anläggningsparken med inte är medtagen. Ytterligare en nackdel är att gamla tekniska lösningar som det inte längre går att få tag i reservdelar till och/eller kompetens för fortsatt underhåll av inte syns i modellen.

Uppdatering i Hydra sker genom att aktuell status av anläggningsförutsättningar uppdateras innan en körning och genom kontinuerligt underhåll och utveckling av modellen. Ändringar såsom bedömningar, relationer mellan anläggningsförutsättningar och oönskade händelser är lätta att justera. (Andreasson, 2001)

3.2 Lillgrund och Uppsala block 5

Ett exempel på en regelmässig riskanalys inom Vattenfall är riskanalysen som genomfördes för den havsbaserade vindkraftparken i Lillgrund år 2006. Samma metod tillämpades också vid byggnationen av avfallsförbränningsanläggningen Uppsala block 5. Riskanalysen är inte kvantifierande utan bygger på en kvalitativ bedömning av riskerna i tre olika allvarlighetsgrader eller konsekvensklasser. Osäkerhetsnivån är indelad i tre klasser och motsvarar sannolikheten för att konsekvensen inträffar. Målet är sedan kontinuerligt arbete med att minska och följa upp riskerna. Metodens första steg är brainstorming där en risklista tas fram. Därefter görs en indelning i tre konsekvensklasser och tre osäkerhetsklasser, vilket totalt gör nio olika riskklasser. Detta resulterar i ett riskbedömningsschema, enligt figur 3.1, i form av en 3*3 matris där y-axeln är konsekvensen av en händelse och x-axeln står för sannolikheten att den ska inträffa. Högst upp i högra hörnet återfinns de största riskerna och längst ner till vänster de minsta.

För att studera projektriskerna beträffande Uppsala block 5 delades riskerna in i fem grupper: (1) Tekniska risker, (2) Projektorganisation, planering och samordning, (3) Personsäkerhet och arbetsmiljö, (4) Juridiska och politiska risker samt (5) Kommunikationsrisker. Varje riskhändelse beskrevs och fick ett nummer som sedan placerades in i riskbedömningssmatrisen. Risker som har eliminerats eller som inte längre är aktuella tas bort från listan. I anslutning till varje riskhändelse beskrevs planerade åtgärder för att reducera och/eller kontrollera risken. Efter en viss tid, exempelvis en månad, uppdateras riskbedömningen och det går därmed att jämföra huruvida riskerna har ökat eller minskat, utifall de planerade åtgärderna har haft önskad effekt. (Attermo, 2006)

Riskbedömningsschema

KONSEKVENSS	3			
	2			
	1			
		1	2	3
		OSÄKERHET/SANNOLIKHET		

Figur 3.1 – Riskmatris (Attermo, 2006).

3.3 Probabilistisk säkerhetsanalys (PSA)

Eftersom kärnteknisk verksamhet är förknippad med mycket stora risker i hanterandet av radioaktiva ämnen så läggs stor möda ner på analyser av olika risker. En milstolpe i riskanalys inom kärnkraften är reaktorsäkerhetsstudien WASH-1400 som presenterades av United States Atomic Energy Commission (AEC) 1974. I studien beräknades sannolikheten för värsta scenariot utsläpp av radioaktiva ämnen till omgivningen. Systemet som bidrog mest till denna topphändelse var kylsystemet där den inledande händelsen med störst bidrag var rörbrott. Denna studie är föregångaren till probabilistisk säkerhetsanalys (även kallad probabilistisk riskanalys) som sedan blivit det viktigaste verktyget för att analysera risk i kärnkraftverk. Idag ställer reglerande myndigheter krav på att PSA-analyser genomförs för drift av kärnteknisk anläggning. (Kumamoto, 1996)

Det finns en rad syften med en PSA-studie:

- Genom noggrann genomgång av anläggningen bidrar den till anläggningskännedom och resultatet kan användas för att förbättra säkerheten i anläggningen.
- Genom analysen verifieras anläggningens säkerhetsnivå och kan jämföras mot säkerhetsmål rörande exempelvis härdskadefrekvens och utsläppsfrekvens.
- Resultaten kan användas för att identifiera de delar av anläggningen och inledande händelser som ger dominerande bidrag till oönskade händelser.
- Undersökningen kan användas som underlag till förbättringsmöjligheter för anläggningen och prioritering mellan dessa.

PSA-analysen kan göras i tre nivåer. I Sverige genomförs endast steg ett och två medan det tredje steget genomförs i bl.a. USA.

Nivå 1: Risk för härdsador. I bilaga J beskrivs nivå 1 utförligare eftersom den är av mer allmän ”riskkaraktär” och inte är kopplad till reaktorfysik. På denna nivå genomförs stegen:

- Identifiering av händelsesekvenser som kan leda till härdsada
- Analys av säkerhetssystemets funktion och tillförlitlighet
- Beräkning av händelsesekvensernas frekvens
- Tolkning och utvärdering av resultatet

Nivå 2: Risk för radioaktiva utsläpp. På denna nivå genomförs stegen:

- Studie av härdsältans uppkomst och beteende i reaktortanken
- Analys av härdsältans beteende i reaktorinneslutningen
- Beräkning av frekvens för utsläpp av radioaktiva ämnen

Nivå 3: Risk för omgivningen. På denna nivå genomförs stegen:

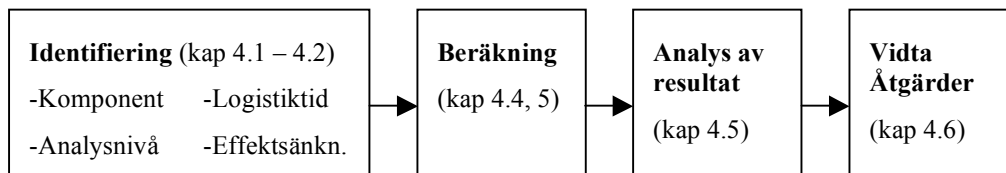
- Beräkning av de radioaktiva ämnernas koncentration vid olika tidpunkter, avstånd från utsläppspunkten och de resulterande stråldoserna
- Uppskattning av uppkomna skador mätt i liv, hälsa och egendom
- Beräkning av frekvensen för olika skador

(Hellström, 2006)

Se bilaga J för en noggrann beskrivning av en PSA-analys på nivå 1.

4 En systematisk metodik för ekonomisk konsekvensanalys

I detta kapitel presenterar vi vår systematiska metodik för att beräkna den ekonomiska konsekvensen för komponenthaveri och rangordna komponenterna utifrån konsekvens och nyckeltal. Först redogörs för hur komponentgrupper relevanta för modellen kan identifieras. Vidare identifieras rätt analysnivå, d.v.s. i vilka eventuella delkomponenter som komponentgruppen kan delas in i. Efter detta görs konsekvenskartläggningen där logistiktid och effektsänkning undersöks. Kapitlet beskriver även hur datainsamling, analys, åtgärder samt uppdatering kan genomföras. Figur 4.1 illustrerar metodiken.



Figur 4.1 – Vår föreslagna metodik.

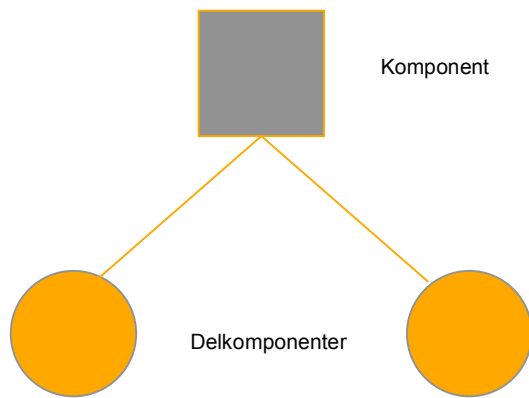
4.1 Identifiering av komponent

Ett första steg i att ta fram en metodik för konsekvensanalys är att identifiera strategiska och produktionskritiska komponentgrupper. Vilka komponenter som har direkt påverkan på produktionen? Vilka av dessa har lång leveranstid och är dyra att anskaffa? Tre krav har ställts upp för val av komponent:

- Komponenten är viktig för produktionen, d.v.s. haveri i komponenten kan resultera i produktionsbortfall. Det ska inte vara möjligt att fortsätta normal drift under längre tid.
- Komponenten är strategisk i det avseende att det kräver omfattande arbete för att beställa liknande enhet. Vidare innebär det att komponenten är dyr att anskaffa och har lång leveranstid.
- Komponentgrupper har ingen avgörande säkerhetsfunktion. Komponenten är produktionskritisk enligt definition i kapitel 1.2.

4.1.1 Val av analysnivå

Analysnivåer som kan väljas är antingen att analysera huvudkomponent, exempelvis matarvattenpump, eller dela in analysen under delkomponenter, exempelvis pumpmotor och pumprotor. Skillnaden illustreras i figur 4.2. Denna process är iterativ där fyra kriterier i varje iteration avgör om analysen ska genomföras på den aktuella komponentnivån eller brytas ned i ytterligare delkomponenter. Problemet är att bestämma hur många iterationer som ska göras innan rätt komponentnivå uppnåts. Om något av de fyra kriterierna inte är uppfyllda görs analysen på den aktuella komponentnivån. Om kriterierna är uppfyllda kan analysen göras på delkomponentnivå.



Figur 4.2 – Komponent och delkomponenter.

- Inköpskostnaden för samtliga delkomponenter ska vara så hög att lagerhållning av reservdel övervägs. Mindre bulkvaror av standardtyp är inte intressanta att studera eftersom de kan lagerhållas billigt eller beställas lätt.
- Samtliga delkomponenter ska vara kritiska för funktionen, d.v.s. att komponenten förlorar sin funktion vid bortfall av någon av delkomponenterna. Eftersom komponenthaveri definieras som att komponenten inte uppfyller sin funktion så är ett krav vid analys på delkomponentnivå att denna är kritisk för komponentens funktion.
- Delkomponenten kan bytas ut i sin helhet vid haveri. Ur definitionen av komponenthaveri i kapitel 1.2 *Definitioner av begrepp* följer att en komponent bör studeras på komponentnivå om den skulle bytas ut i sin helhet vid ett haveri.
- Delkomponenterna är mekaniskt oberoende, vilket innebär att ett haveri i den ena delkomponenten inte leder till ett haveri i den andra och vice versa.

Dessa principer kan illustreras med exemplet huvudkomponent 443-

Huvudkylvattenpump som finns redovisat i detalj i bilaga B. Där har analysen av huvudkomponenten gjorts i två delanalyser av delkomponenterna pumpmotor och pumprotor (pumppaxel och pumphjul). Pumprotorn har studerats som komponent och har inte delats upp ytterligare i delkomponenterna pumppaxel och pumphjul.

Inköpskostnaden för pumprotor och pumpmotor är så stora att reservdelar inte utan vidare kan lagerhållas. Vidare är både pumpmotor och pumprotor kritiska för pumpens funktion. Haveri i någon av dessa slår ut pumpens funktion. Pump och rotor är separerade från varandra med kopplingar vilket medför att ett haveri i motorn med största sannolikhet inte leder till haveri i rotern och vice versa. Inköpskostnaden för en pumprotor är fyra till fem gånger större än för en motor vilket medför att det blir olika konsekvenser vid haveri i respektive komponent. Leveranstiden vid inköp av ny komponent skiljer sig åt så mycket att det kommer att påverka konsekvensen. På Forsmark lagerhålls motor och rotor separat och vid haveri i någon av dem finns ingen anledning att byta båda eftersom haveriet antas vara avgränsat till delkomponenten.

Som delkomponenter uppfyller axel och hjul alla kriterier ovan förutom oberoendekriteriet. Det är möjligt att ett axelbrott skulle leda till att pumphjulet havererar. Rotorn bör därför inte delas upp ytterligare utan kan studeras som en komponent.

4.2 Konsekvenskartläggning

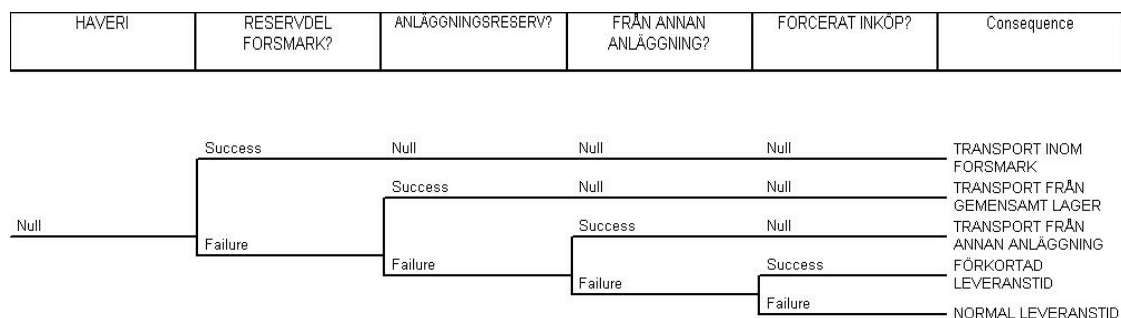
Med hjälp av händelseträd kan parametrar som bestämmer konsekvensens rörliga del kartläggas, se kapitel 5.3.1 *Rörliga och fasta kostnader*. För detta ändamål har två händelseträd tagits fram, ett för logistiktid och ett för effektsänkning. I händelseträdet för logistiktid, figur 4.3, identifieras tiden tills att komponenten är på plats för montering och provning. I händelseträdet för effektsänkning, figur 4.4, identifieras hur stor andel i procent av elproduktionen som förloras som följd av komponenthaveriet.

4.2.1 Identifiering av logistiktid

I händelseträdet för identifiering av logistiktid, figur 4.3, identifieras tiden det tar för att få en ny komponent redo för montering och provning. Logistiktid identifieras genom att studera förutsättningarna enligt fallen reservdel tillgänglig respektive reservdel otillgänglig.

Om reservdel finns i lager kan den vara tillgänglig eller otillgänglig. En tillgänglig reservdel på lager kan antingen finnas på det egna lagret eller som samägd reservdel lokaliserad på annan plats. En otillgänglig reservdel är en reservdel som har åldrats i lager, inte kan hittats p.g.a. administrativa problem eller inte har uppdaterats parallellt med uppdatering av anläggningen.

Om reservdel saknas, eller reservdel är otillgänglig, måste ersättningskomponent anskaffas. Första steget är att försöka anskaffa ersättningskomponent från andra kärnkraftverk, både i Sverige och globalt. Om detta inte är möjligt måste ersättningskomponent anskaffas från leverantör. I vissa fall är det då möjligt att genomföra ett forcerat inköp som innebär att leveranstiden förkortas och inköpskostnaden höjs. Det sista och troligen värsta alternativet är normalt inköp från leverantör.



Figur 4.3 – Träd 1: Logistiktid.

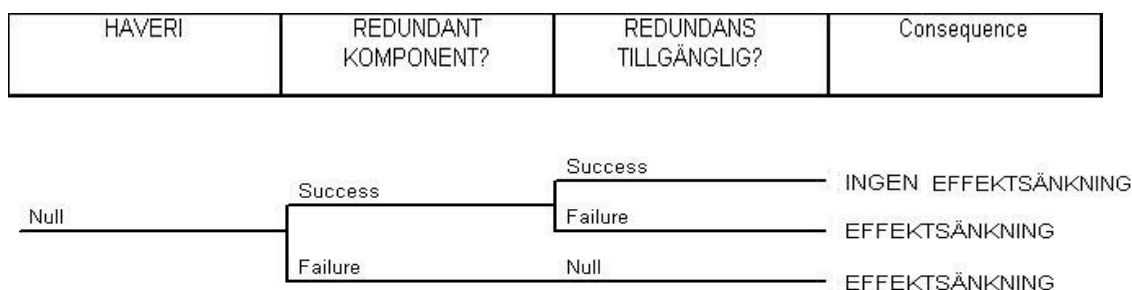
4.2.2 Identifiering av effektsänkning

I händelseträdet för identifiering av effektsänkning, figur 4.4, identifieras den effektsänkning som komponenthaveriet orsakar. Effektsänkning identifieras genom att studera förutsättningarna enligt fallen komponent ingår i redundant respektive ickeredundant krets samt komponentens driftförutsättningar.

Om komponenten ingår i redundant krets kan redundansen vara otillgänglig. Detta beror på att någon av komponenterna i den redundant kretsen är otillgänglig p.g.a. service, kontroll, reparation eller dolda fel. Vanligt inom kärnkraften är att det finns s.k. två av tre system, där varje system ansvarar för 50% vilket gör att en enhet kan falla bort utan

effektsänkning. Ett sådant system klarar bortfall av en komponent eftersom varje komponent i kretsen kan leverera 50%.

För produktionskritiska komponenter finns driftförutsättningar om effektsänkning vid bortfall av funktion. I vissa fall kan detta vara tidsberoende på så sätt att det under en viss tid är möjligt att fortsätta drift med angiven effekt. Om problemet kvarstår efter den angivna tidsramen måste effektnedgång göras. Vi utgår från att logistiktid och monterings tid alltid är större än denna tidsram.



Figur 4.4 – Träd 2: Effektsänkning.

4.3 Datainsamling

För att bedöma den ekonomiska konsekvensen för varje specifik komponent kan intervjuer genomföras med experter på komponenten som ska undersökas. Dessa intervjuer kan då utgå från ett av oss framtaget frågeschema, se bilaga C. Intervjuerna kan därmed ligga till grund för att göra händelsekartläggning samt bedöma analysnivå och komponentstatus.

Även om det är fullt möjligt att organisera informationsinsamlandet i enkätform så kan det vara bra att introducera informanterna för förutsättningarna och randvillkoren i intervjuform. En lämplig arbetsordning är att informanten utifrån sin expertkunskap hjälper till med komponentavgränsningen och får enkäten förklarad för sig vid ett intervjutillfälle. Sedan kan informanten fylla i enkäterna på egen hand.

De tryckta källor som i första hand använts är Failure Safety Analysis Report (FSAR) och Säkerhetstekniska föreskrifter (STF). Dessa dokument är båda specifika för respektive reaktorblock.

FSAR är ett dokument som utgör säkerhetsredovisningen för respektive reaktorblock och som är avsett att ligga till grund för kärnkraftägarens ansökan om tillstånd att driva anläggningen. Det beskriver alla delsystem i kärnkraftverket under normal och onormal drift. Här finns även information om konsekvenserna av utebliven funktion. Kraven i FSAR måste efterföljas för att kriterierna för tillstånd att driva kärnkraftverket ska uppfyllas. FSAR är grovt uppdelad enligt följande: *Systemets uppgifter* där drift-uppgifter och eventuella säkerhetsuppgifter beskrivs, *Allmän beskrivning* av systemet, *Systemets funktion* under normal och onormal drift, *Situationsanalys*, *Systemutformning*, *Allmänna driftsynpunkter* samt *Teknisk specifikation*. I FSAR kan exempelvis information gällande eventuell effektsänkning vid onormal drift och antal identiska enheter tas fram.

STF beskriver de krav som SKI ställer på driften av kärnkraftverk. Ändring av direktivet eller planerade tillfälliga avsteg skall föregås av säkerhetsgranskning. Direktivet ämnar i första hand garantera omgivningens säkerhet, varför anläggningen i

alla oklara situationer skall kvarhållas eller sättas i ett säkert tillstånd. STF är indelat i fem kapitel: *Allmänt*, *Högsta tillåtna gränsvärde*, *Villkor och begränsningar för drift*, *Provningar och inspektioner* samt *Administrativa föreskrifter*. Kapitel 3 *Villkor och begränsningar för drift* är i detta fall det av störst intresse då det för varje fall beskrivs hur begränsningar rörande drifttid, effektnivå samt vidtagande av åtgärder skall hanteras.

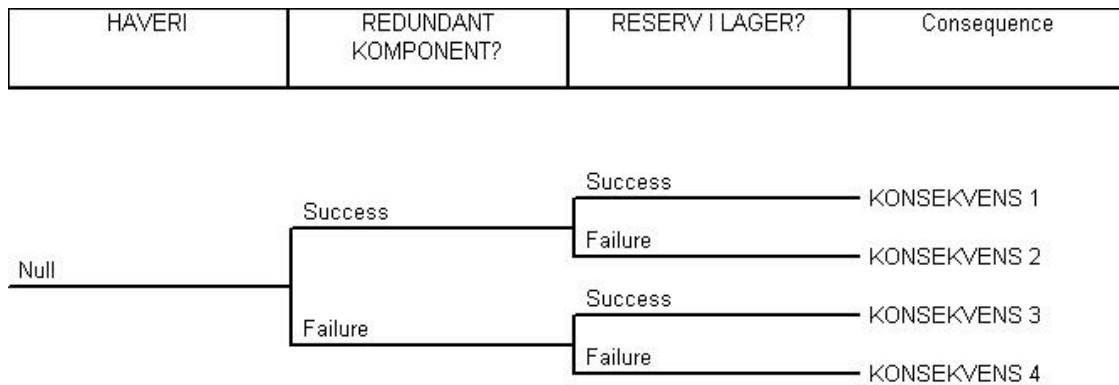
4.3.1 Osäkerhet i indata

En stor del av den information vi har inhämtat är behäftad med osäkerheter. Osäkerheter som är förknippade med de olika parameterskattningarna är:

- Inköpskostnaden för ersättningsdel har skattats av personer inblandade i nyinköp av dessa eller liknande delar. Osäkerheten i denna kostnad beror på att varje inköp är en ny förhandling där en mängd parametrar inverkar på priset. Den starka råvaruprisökningen tillsammans med uppsvinget för kärnkraft i världen under de senaste åren innebär högre priser och längre väntetid. (Njurling, 2006)
- Logistiktid och arbetskostnad vid montering kan skattas utifrån åtgärdsplaner som specificerar arbetsgång vid montering. Osäkerheten i dessa faktorer kan anses vara mindre än för inköpskostnaden.
- Olika komponentskattningar har gjorts av olika experter. Faran i detta är att skattningarna kan ha skett på olika sätt beroende på personliga erfarenheter och referensramar. Det formella frågeschemat underlättar konsistens i svaren eftersom frågorna alltid formuleras lika.
- Ett problem vid parameterskattning är bias vid provokation av en skattning (Kumamoto, 1996). I de fall då informanterna inte har kunnat ge någon skattning har parameterskalor provocerat fram antagande. Eftersom informanten då kan förhålla sig till olika alternativ är det lättare att ge en skattning. En fara med detta tillvägagångssätt är att informantens skattning påverkas mycket av hur intervallen utformas. Det kan dock sägas att skattningen kan antas vara bättre än ingen skattning alls.

4.4 Beräkning med föreslagen modell

Konsekvensberäkningarna utförs olika beroende på om komponenten ingår i redundant krets eller inte samt om det finns reservdel i lager eller inte. Dessa alternativ resulterar i fyra konsekvensutfall, se figur 4.5, som avgör vilken ekvation som används. Se även bilaga K *Konsekvensklasserna illustrerade med Markovkedjor* för skillnad mellan de fyra konsekvensklasserna.



Figur 4.5 – Konsekvensklasser.

Detta resulterar i fyra konsekvensklasser:

- Konsekvens 1: Redundant komponent med reservdel.
- Konsekvens 2: Redundant komponent utan reservdel.
- Konsekvens 3: Ickeredundant komponent med reservdel.
- Konsekvens 4: Ickeredundant komponent utan reservdel.

4.5 Analys av konsekvensresultat

Här redovisas hur resultaten från beräkningsmodellen kan analyseras genom rangordning utifrån konsekvens eller ett antal nyckeltal, vilka beskrivs nedan. Skattningar av indata är behäftade med osäkerheter av olika grad, se kapitel 4.3.1 *Osäkerheter i indata*. För att analysera dessa osäkerheter genomförs en känslighets- och osäkerhetsanalys.

4.5.1 Rangordning utifrån konsekvens

Rangordning av komponenters ekonomiska konsekvens kan ske utifrån tre fall:

- Konsekvens utifrån nuvarande antal strategiska reservdelar i lager.
- Konsekvens utifrån hypotesen att tillgänglig reservdel finns i lager.
- Konsekvens utifrån hypotesen att reservdel inte finns i lager.

För det tredje alternativet gäller att konsekvensen beräknas utifrån något av fallen: anskaffa komponent från annan anläggning, forcerat inköp eller normalt inköp. Detta följer logiken i händelseträdet för att bestämma logistiktiden, figur 4.3. Nuvarande konsekvens är troligen mest intressant att rangordna utifrån då denna visar den verkliga situationen. Det bör även vara intressant att rangordna utifrån konsekvens reservdel saknas eftersom det visar komponenternas inherent konsekvenser givet att ingen reservdelsstrategi finns. Det ger alltså en bild av den grundläggande konsekvensnivån i anläggningen.

4.5.2 Rangordning utifrån nyckeltal

Utöver de ekonomiska konsekvenserna kan komponenterna även rangordnas utifrån nyckeltalen:

- Konsekvensreduktionsfaktor.
- Konsekvensökning per dygn.
- Brytpunkt för mean time between failure ($MTBF_{BRYT}$) för alla de komponenter som kan dela på samma reservdel.
- Brytpunkt för sannolikheten att reservdelen kommer att efterfrågas under sin livslängd ($P_{BRYT}(\text{reservdelsefterfrågan})$) för alla de komponenter som skulle kunna efterfråga samma reservdel.

Konsekvensreduktionsfaktor, som beräknas enligt ekvation 4.1, visar hur mycket konsekvensen reduceras per investerad krona om en reservdel köps in. Ett stort värde på konsekvensreduktionsfaktorn innebär att det troligen är lönsamt att ha reservdel i lager. Analogt med detta innebär ett litet värde på konsekvensreduktionsfaktorn att det antagligen inte är lönsamt att ha reservdel i lager. Om värdet på konsekvensreduktionsfaktorn är mindre än ett är det direkt olönsamt att ha reservdel i lager eftersom konsekvensreduktionen då är mindre än inköpskostnaden.

$$\text{Konsekvensreduktionsfaktor} = \frac{\text{Konsekvens utan reservdel} - \text{Konsekvens med reservdel}}{\text{inköpskostnad}} \quad (4.1)$$

Kostnadsökning per dygn är ett nyckeltal som visar hur mycket konsekvensen ökar per dygn. Se kapitel 5.4.1 *Produktionsbortfallskostnad* för beräkningsekvation för produktionsbortfall. Syftet med att studera hur mycket konsekvensen ökar per dygn är att jämföra hur den rörliga delen av konsekvensen, produktionsbortfallet, skiljer sig åt mellan olika komponenter. Produktionsbortfallet kan minimeras genom att reservdel lagras eller genom att samarbetsavtal med andra kraftverk eller med leverantör skrivs. Ett sätt att identifiera komponenter där det är extra viktigt att minimera logistiktid är att rangordna komponenterna utifrån konsekvensökning per dygn. Se kapitel 4.6 *Vidta åtgärder* för strategier för att minimera logistiktid.

$MTBF_{BRYT}$, se formel 4.2, är ett nyckeltal som ger en brytpunkt som sedan kan jämföras med en bedömning av det verkliga mean time between failure för alla komponenter i anläggningen som delar på samma reservdel, vilket benämns $MTBF_{ANL}$. $MTBF_{BRYT}$ anger vad $MTBF_{ANL}$ som högst kan vara för att det ska vara lönsamt att lagra komponent. Utifrån detta kan vi formulera ett lönsamhetskriterium för $MTBF_{ANL}$: Om $MTBF_{ANL} < MTBF_{BRYT}$ är det lönsamt att lagra reservdel.

$$MTBF_{BRYT} = \frac{\text{Konsekvens utan reservdel} - \text{Konsekvens med reservdel}}{\text{Årlig kostnad reservdel i lager} * \text{Antal komponenter}} \quad (4.2)$$

där,

Antal komponenter – Det antal komponenter i anläggningen som delar reservdel.

$$\text{Årlig kostnad reservdel i lager} = \text{Inköpskostnad} * \text{Annuitetetsfaktor} \quad (4.3)$$

där,

$$\text{Annuitetsfaktor} = \frac{p}{1 - (1 + p)^{-n}} \quad (\text{Olsson, 2005}) \quad (4.4)$$

där,

p – Kalkylränta.

n – Antal år som kalkylen omfattar (motsvarar här komponentens livslängd).

Nyckeltalet $P_{\text{BRYT}}(\text{reservdelsefterfrågan})$ visar samma sak som $\text{MTBF}_{\text{BRYT}}$ men utifrån begreppet sannolikhet. Sannolikhet kan beräknas ur MTBF, vilket visas i formel 4.5. $P_{\text{BRYT}}(\text{reservdelsefterfrågan})$ ger även den en brytpunkt som kan jämföras med en bedömning av den verkliga sannolikheten att någon av komponenterna i anläggningen havererar under reservdelens livslängd eller någon annan vald tidsperiod (T), vilket benämns $P_{\text{ANL}}(\text{reservdelsefterfrågan})$. $P_{\text{BRYT}}(\text{reservdelsefterfrågan})$ anger vad $P_{\text{ANL}}(\text{reservdelsefterfrågan})$ som lägst kan vara för att det ska vara lönsamt att ha reservdel i lager. Utifrån detta kan vi på samma sätt som ovan formulera ett lönsamhetskriterium för $P_{\text{ANL}}(\text{reservdelsefterfrågan})$: Om $P_{\text{ANL}}(\text{reservdelsefterfrågan}) > P_{\text{BRYT}}(\text{reservdelsefterfrågan})$ är det lönsamt att lagrhålla reservdel.

$$P_{\text{BRYT}} = 1 - e^{-\left(\frac{1}{\text{MTBF}_{\text{BRYT}}} * T\right)} \quad (4.5)$$

För att dra nytta av nyckeltalen $\text{MTBF}_{\text{BRYT}}$ och $P_{\text{BRYT}}(\text{reservdelsefterfrågan})$ bör det finnas en uppfattning om vad som är en rimlig MTBF_{ANL} eller $P_{\text{ANL}}(\text{reservdelsefterfrågan})$ för den aktuella komponenten.

4.5.2.1 Exempel på beräkning med nyckeltal

För att illustrera och bättre förklara nyckeltalen följer här ett exempel där de olika nyckeltalen beräknas utifrån data från komponenten 431-Generatorlager. De data som används för beräkningarna är sammanställda i tabell 4.1 och är hämtade ur bilaga A *Data för analyserade komponenter*.

Parameter	Värde
Antal komponenter i anläggningen	4 st.
Inköpskostnad (geom. medel)	548 kSEK
Konsekvens med reservdel	45 208 kSEK
Konsekvens utan reservdel	743 100 kSEK
Kalkylränta (p)	8%
Komponentens livslängd (n , T)	20 år

Tabell 4.1 – Parametervärden för nyckeltalsberäkning för 431-Generatorlager.

Med dessa parametervärden beräknas alla nyckeltal utom konsekvensökning per dygn. Se kapitel 5.4.1 *Produktionsbortfallskostnad* för beräkningsekvationen för konsekvensökning per dygn.

$$\text{Konsekvensreduktionsfaktor (4.1)} = \frac{743100 - 45208}{548} = 1274$$

$$\text{Annuitetsfaktor (4.3)} = \frac{0,08}{1 - (1 + 0,08)^{-20}} = 0,1019$$

$$\text{Årlig kostnad reservdel i lager (4.4)} = 548 * 0,1019 = 55,84 \text{ kSEK}$$

$$\text{MTBF}_{BRYT} (4.2) = \frac{743100 - 45208}{55,84 * 4} = 50042 \text{ år}$$

$$P_{BRYT} (4.5) = 1 - e^{-\left(\frac{1}{50042} * 20\right)} = 0,002$$

4.5.3 Känslighets- och osäkerhetsanalys av modellparametrar

Känslighetsanalys är en statistisk metod för att bedöma hur stabila de framtagna resultaten är. I vårt fall syftar känslighetsanalys av modellparametrarna till att identifiera de parametrar som inverkar mycket respektive lite på modellens resultat. Detta görs genom att notera hur konsekvensen ändras då en parameter ändras med en viss faktor medan de andra parametrarna konstanthålls. Detta resultat kan användas för att identifiera de parametrar som påverkar modellen mest och som därmed kan sägas vara känsligast för osäkerhet i indata.

Nära besläktat med känslighetsanalys är osäkerhetsanalys. Skillnaden är att resultatet i känslighetsanalysen fås fram genom att konsekvensberäkningen genomförs en gång för varje parameter som analyseras och med ett ökat värde endast på den aktuella parametern. Vid osäkerhetsanalys tilldelas varje osäker parameter en osäkerhetsfördelning och sedan simuleras ett stort antal beräkningar med Monte Carlo-teknik. D.v.s. att ett nytt parametervärde slumpmässigt dras ur varje parameters osäkerhetsfördelning för varje simulering. Utifrån detta kan konsekvensens fördelning beräknas. Syftet med att få en bild av den totala osäkerheten i en modell är att utreda om noggrannheten i parametrarna är tillfredställande. Osäkerhetsanalys visar hur stor spridningen i resultatet är, vilket kan ge en indikation på hur försiktigt analysen bör göras. D.v.s. vilka slutsatser som kan vara berättigat att dra utifrån resultaten.

4.6 Vidta åtgärder

Vid stor konsekvens för nuvarande reservdelsstatus bör haverisannolikhet på något sätt uppskattas. Om denna inte kan anses vara obetydlig bör en handlingsplan upprättas. Handlingsplanen kan innehålla uppgifter om hur ersättningskomponent ska anskaffas och vems ansvar det är att övervaka att handlingsplanen är genomförbar d.v.s. att ersättningsdelen verkligen kan anskaffas på avsett vis. Vidare kan den innehålla en kartläggning av reservdelar på andra anläggningar. Vilka leverantörer som kan anlitas och vilka avtal som kan tecknas med dem kan också utredas i en handlingsplan. Om det vid konsekvenskartläggningen kommer fram att komponenten endast går att anskaffa

genom normalt inköp från leverantör ger detta ytterligare stöd för att anläggningen borde ha en eller flera strategiska reservdelar.

Vid liten nuvarande konsekvens bör de komponenter som har reservdel studeras närmare med avseende på haverisannolikhet. Om den bedöms vara tillräckligt liten bör överväganden göras huruvida det är kostnadseffektivt att ha reservdel i lager eller inte. Om haverisannolikheten för komponenten är tillräckligt låg bör anläggningen inte ha reservdel i lager. Tillräckligt hög eller låg haverisannolikhet är en bedömning som kärnkraftverket får göra.

Om en reservdel finns i lager på kärnkraftverket eller som anläggningsreserv bör komponentens status undersökas. Detta för att verifiera att reservdelen är i funktionsdugligt skick samt att reservdelen har uppdaterats parallellt med anläggningsförändringar. Om reservdel inte finns i lager kan en reservdel köpas in från leverantör om det bedöms som lönsamt. Till grund för inköpsbeslut kan nyckeltalen analyseras, se resonemang nedan. Nästa alternativ är att kontakta andra anläggningar för att kartlägga om någon reservdel som kan användas finns tillgänglig och samarbete kring reservdelar kan upprättas. Sista steget i handlingsplanen bör vara att kontakta leverantörer för en uppfattning om pris och leveranstid för komponenter. Det kan tänkas att anläggningen genom avtal med leverantör kan garanteras en viss leveranstid. Det kan vara intressant för anläggningen att undersöka om ett forcerat inköp skulle vara möjligt och i så fall till vilken kostnad och tid.

Konsekvens utan reservdel kan användas som rangordningsparameter för att göra en analys av värsta fallet. Förutsättningarna för den jämförelsen är då att eventuell reservdel inte kan användas och det bästa möjliga alternativet enligt rangordningen annan anläggning, forcerat inköp eller normalt inköp genomförs. För komponenter som hamnar högt i denna ranking är det av största vikt att utreda samarbete med annan anläggning eller leverantör. Detta oavsett om reservdel finns i lager eller inte eftersom det finns en risk att reservdelen är otillgänglig. Summering av konsekvens utan reservdel för alla ingående komponenter ger en total konsekvensnivå för anläggningen.

För en prioritering mellan komponenter vid utformning av lagerstrategi kan något av nyckeltalen konsekvensreduktionsfaktor, konsekvensökning, $MTBF_{BRYT}$ och P_{BRYT} (reservdelsefterfrågan) användas. Förutsatt att $MTBF_{ANL}$ är i samma storleksordning för en grupp komponenter så kan de jämföras utifrån storleken på konsekvensreduktionsfaktorn. Rangordningen visar då vilka komponenter som ger störst konsekvensreduktion per investerad krona vid inköp av reservdel. Ett alternativ är att jämföra komponenterna utifrån nyckeltalet konsekvensökning per dygn. Det visar hur stor summa som förloras per dygn och ger en indikation på vilka komponenter som det är extra viktigt att minimera logistiktiden för.

Givet att en rimlig skattning av antingen $MTBF_{ANL}$ eller P_{ANL} (reservdelsefterfrågan) kan göras (vilket inte ingår i detta examensarbete) så kan dessa jämföras mot $MTBF_{BRYT}$ respektive P_{BRYT} (reservdelsefterfrågan) för att få en indikation om lagerhållning av reservdel är lönsam, se bilaga I. Dessa resultat kan användas som underlag inför beslut om vissa reservdelar som redan finns i lager ska användas eller om komponenter som saknar reservdelar bör ha det.

4.7 Uppdatering

Eftersom ett antal av parametrarna i modellen ändras med tiden kommer också resultaten att bli inaktuella med tiden. För att hantera detta problem kan de parametrar

som förändras över tid och samtidigt bidrar betydligt till konsekvensen uppdateras med vissa tidsintervall. Det är viktigt att det finns rutiner i organisationen mellan vilka tidsintervall uppdatering ska ske och vem som är ansvarig för att det genomförs.

5 En modell för beräkning av ekonomisk konsekvens

I detta kapitel beskrivs den modell som vi har tagit fram för att beräkna ekonomisk konsekvens för produktionskritiska komponenter i kärnkraften. Denna modell har vi använt på 24 komponenter, se kapitel 6 *Fallstudie på Forsmark*. Kapitlet tar bland annat upp vilka krav som från början av arbetet ställdes på modellen, antaganden och förenklingar vi gjort, hur konsekvensformlerna ser ut samt hur parametrarna operationaliserats.

5.1 Krav på beräkningsmodellen

Ett antal grundläggande krav har från början av arbetet ställts på modellen av vår uppdragsgivare PDM. Det är med dessa krav i åtanke som vi har tagit fram beräkningsmodellen. Modellen ska:

1. Beräkna ekonomisk konsekvens av komponenthaveri.
2. Kunna rangordna komponenter utifrån ekonomisk konsekvens.
3. Kunna ändra parametrar gemensamma för alla komponenter på ett enkelt sätt.
4. Vara enkel att använda.
5. Vara robust.

För att uppfylla krav (1) och (2) kan användaren av modellen få svar på följande ur konsekvensberäkningarna:

- Hur stor blir den ekonomiska konsekvensen vid komponenthaveri givet nuvarande antal strategiska reservdelar i lager?
- Hur stor blir den ekonomiska konsekvensen vid komponenthaveri då reservdel finns i lager?
- Hur stor blir den ekonomiska konsekvensen vid komponenthaveri då reservdel inte finns i lager?
- Var reducerar en investerad krona i strategiska reservdelar den ekonomiska konsekvensen mest?
- Hur stor är konsekvensökningen per dygn för en havererad komponent?
- Hur stor kan $MTBF_{ANL}$ högst vara för att det ska vara lönsamt att lagerhålla reservdel?
- Hur liten kan $P_{ANL}(\text{reservdelsefterfrågan})$ lägst vara för att det ska vara lönsamt att lagerhålla reservdel?

Krav (3) uppfylls genom att de gemensamma (globala) parametrarna lätt kan ändras. För att hantera krav (4) har vi gjort antaganden och förenklat beräkningsmodellen så långt som möjligt. Samtidigt har vi arbetat med att göra frågeschemat så enkelt som möjligt. Vidare har vi för krav (5) i så stor utsträckning som möjligt sett till så att modellen inte är känslig för skattningsosäkerheter, se kapitel 6.5 *Osäkerhetsanalys i Crystal Ball*.

5.2 Antaganden och förenklingar

Definitionen av en modell är att det är en förenkling av verkligheten där vissa antaganden gjorts. I detta avsnitt följer en beskrivning och diskussion kring de antaganden och förenklingar som vi har bedömt som relevanta och möjliga att göra. Detta för att göra det möjligt att bygga en hanterbar modell med ett begränsat antal parametrar.

5.2.1 Redundanta komponenter

Vid beräkning av konsekvens för redundanta komponenter finns det en problematik kring huruvida redundansen i den normalt redundanta kretsen är tillgänglig eller inte vid ett haveri. För att skatta sannolikheten att den redundanta komponenten är tillgänglig finns det två huvudsakliga tillvägagångssätt:

- Summera beräknade sannolikheter: Här ingår sannolikheten att ytterligare en komponent i den redundanta kretsen havererat till följd av fel med gemensam orsak (CCF), något oberoende fel samt sannolikheten att ytterligare en komponent i den redundanta kretsen är otillgänglig p.g.a. kontroll, dolda fel, pågående reparation eller service. Dessa sannolikheter ger tillsammans en uppskattning av sannolikheten att det normalt redundanta systemet inte är redundant.
- Skatta en sannolikhet: Ett enklare tillvägagångssätt är att svara på frågan ”Är redundansen tillgänglig?” med en skattning av sannolikheten att den är det respektive inte är det.

Fördelen med det första alternativet är att skattningen är mer verklighetsnära men med nackdelen att det medför en betydligt mer komplicerad modell och mer omfattande datainsamling. Det andra alternativet är en grov förenkling som innebär enkla beräkningar. Valet av tillvägagångssätt innebär därmed ett val mellan noggrannhet och enkelhet. Förstudierna av konsekvensen för redundanta komponenter indikerade att produktionsbortfallet var litet i förhållande till åtgärdandekostnaden vilket tillåter en mindre noggrann skattning.

Vi har valt att i vår modell använda det senare alternativet med en kvalificerad skattning av sannolikhet. Denna skattning bygger på antagandet att ett redundant system aldrig är mer än tio gånger mer tillförlitligt än ett ickeredundant system. Detta antagande motiveras med ett resonemang byggt på Markovkedjor och finns bifogat som bilaga G. Otillgänglig redundans innefattar möjligheterna att någon av komponenterna i den redundanta kretsen är ur drift p.g.a. kontroll, dolda fel, pågående reparation eller service. Detta antagande innebär att vi i vår beräkningsmodell använder defaultvärdet 0,9 för sannolikheten att redundansen är tillgänglig. Den förväntade konsekvensen för haveri i en redundant komponent kan då beräknas som $1 - 0,9 = 0,1$ multiplicerat med konsekvensen för samma system utan redundans. Konsekvensen för en redundant komponent kommer alltså vara en tiondel av konsekvensen för samma komponent i ett ickeredundant system.

5.2.2 Revision

Varje år genomförs en kort eller lång revision då delar av bränslet byts ut eller flyttas och då komponenter servas eller byts ut. Under revisionen är reaktorn helt avställd och ingen el produceras. Eftersom kärnkraftverket inte går miste om producerad el i det

fallet att ett haveri inträffar i anslutning till en revision så påverkas produktionsbortfallet av sättet att räkna på revision. Två möjliga tillvägagångssätt att hantera revision är:

- Räkna med två olika haverifall: Konsekvensberäkningen delas upp i de två fallen haveri upptäcks under drift samt fel som medför byte av komponent upptäcks under revision. De två fallen vägs samman genom att andelen haverier under drift i förhållande till andelen allvarliga felupptäckter under revision uppskattas. En förutsättning för detta är att ett fel kan upptäckas under revision som gör att komponenten måste bytas ut. Det kan antas rimligt att om ett fel upptäcks under revision är det en större del av revisionen kvar om det antas att komponenter som ska servas under revision demonteras så fort som möjligt. Vilket medför att tiden för revision kan dras av från logistiktiden.
- Räkna med verklig årsproduktion: Den faktiska årsmedelproduktionen används vid beräkning av produktionsbortfall. I detta fall slås revision samman med andra produktionsstörande, oönskade händelser genom att load factor, d.v.s. hur stor del av den teoretiska maxproduktionen under året som utnyttjas används. Se bilaga H för definition av load factor.

En fördel med det första fallet är att det går att särredovisa ett bästa fall där ett komponentfel som upptäcks under revision ger lägre konsekvens än ett haveri som upptäcks under drift. En andra fördel är att hänsyn tas till att produktionsbortfallet blir mindre om revision utgör en del av logistik- och monterings-tid. Nackdelar är att komplicerade beräkningar med sannolikheter för att det är x antal dagar kvar på revisionen måste göras. Det andra alternativet har den fördelen att det inte har någon betydelse när haveriet inträffar. Händelser som påverkar produktionen, exempelvis snabbstopp, tas i beaktning. Nackdelen är att det blir otydligt vad som är revision och vad som är andra produktionsuppehåll. Denna uppdelning har dock ingen större betydelse för modellen då siffran som är av intresse är den el som kraftverket verkligen producerar och säljer till kund, vilket load factor är ett bra mått på.

Av de två alternativen ovan valdes det andra där årsmedelproduktionen slås ut jämt över alla möjliga haveritidpunkter. Grunden för detta val är att det är för osannolikt att anta att fel som är så allvarliga att en produktionskritisk komponent måste bytas ut inte upptäcks under drift. Komponenter övervakas under drift och förhöjda värden på exempelvis vibration, temperatur och effekt gör att fel i stor utsträckning upptäcks. Load factor används vid kärnkraftverk vilket gör att det finns tillförlitliga data att tillgå (Jansson, 2006).

5.2.3 Övriga antaganden och förenklingar

Ytterligare ett antal förenklingar inom olika områden har genomförts:

- Tid på året då haveriet inträffar: Förutsättningarna för kraftproduktion varierar som bekant under året. Under sommaren står reaktorerna stilla för revision eftersom efterfrågan på el historiskt har varit lägre. På vintern är efterfrågan hög samtidigt som det kalla kylvattnet höjer verkningsgraden i kärnkraftverket (Rundberg, 2006) och (Njurling, 2006). En verklighetsnära modell skulle kunna ta hänsyn till skiftande efterfrågan och varierande kylvattentemperatur. Vi har dock valt att inte ta hänsyn till dessa faktorer för att göra modellen hanterbar.
- Upptäckten av haveriet: Haveri skulle i teorin kunna upptäckas genom antingen larm till kontrollrum eller genom inspektion. Eftersom komponenterna som

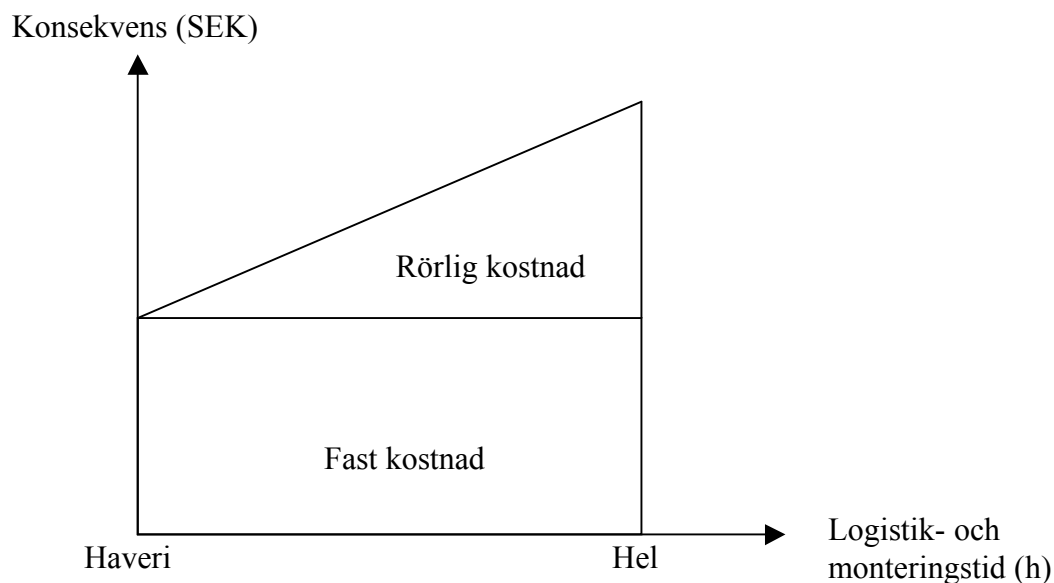
studeras antas vara kritiska för produktionen kan det anses rimligt att anta att larm är kopplat till bortfall av komponenternas funktion.

- System utan reservdelar: Kärnkraftverken innehåller en stor mängd gammal teknik där det till vissa system kan vara svårt att få tag på reservdelar. Vi antar i modellen att det alltid går att få tag på reservdelar till de system som ska studeras. Vi förutsätter då att system för vilka reservdelar slutat tillverkas bytts ut.
- Åtgärda haveri vid nästa revision eller stillestånd: Detta förfaringssätt förekommer på Forsmark där fel som ska åtgärdas vid nästa stopp registreras på en stopplista (Jansson, 2006). Vi anser det emellertid vara irrelevant att ta hänsyn till denna möjlighet i modellen eftersom den ska användas på kritiska komponenter. Det verkar otroligt att ett haveri i en kritisk komponent inte påverkar produktionen mer än att beslut tas att vänta till nästa revision. Dessutom är det endast relevant i de fall produktionen måste stoppas för att åtgärda haveriet. Detta är troligen fallet i högre utsträckning för säkerhetskritiska än produktionskritiska komponenter.
- Alltid inköp av ny komponent vid haveri: Ett antagande i modellen är att en ny komponent köps in i lager när den befintliga reservdelen använts. Modellen utgår alltså från att strategier angående reservdelshållning inte varierar över tiden.

5.3 Kostnadselement

I kapitel 1.2 beskrevs anläggningsrisk som summan av åtgärdandekostnad, produktionsbortfallskostnad och tidigareläggandekostnad. Denna definition har använts som utgångspunkt för att formulera en konsekvenskostnadsmodell. Vår konsekvenskostnadsmodell är uppbyggd av elementen produktionsbortfallskostnad, åtgärdandekostnad samt uteblivna rörliga produktionskostnader. Nedan följer en nedbrytning av dessa kostnadselement i ytterligare delar.

Förenklat kan den ekonomiska konsekvensen delas upp i en rörlig och en fast del. Den fasta delen utgörs av åtgärdandekostnaden och finns därmed alltid med i beräkningarna oavsett antalet reservdelar i lager och redundans. Den rörliga kostnaden som består av produktionsbortfallskostnad minus uteblivna rörliga kostnader, ökar linjärt över tiden. Detta resonemang illustreras av figur 5.1 som visar hur den ekonomiska konsekvensen för komponenthaveri utvecklas från haveriet och framåt.



Figur 5.1 – Rörliga och fasta kostnader.

5.3.1 Inkluderade kostnadselement

De inkluderade kostnadselementen i beräkningsmodellen är åtgärdandekostnad, produktionsbortfallskostnad och uteblivna rörliga produktionskostnader.

Åtgärdandekostnaden inkluderar alla kostnader för att återställa funktionen i anläggningen. Eftersom denna studie endast tar hänsyn till att komponenter som havererar måste bytas ut så innebär åtgärdandekostnad alla de kostnader som krävs för att få tag på ersättningskomponent, installera och prova den. I beräkningsmodellen ingår:

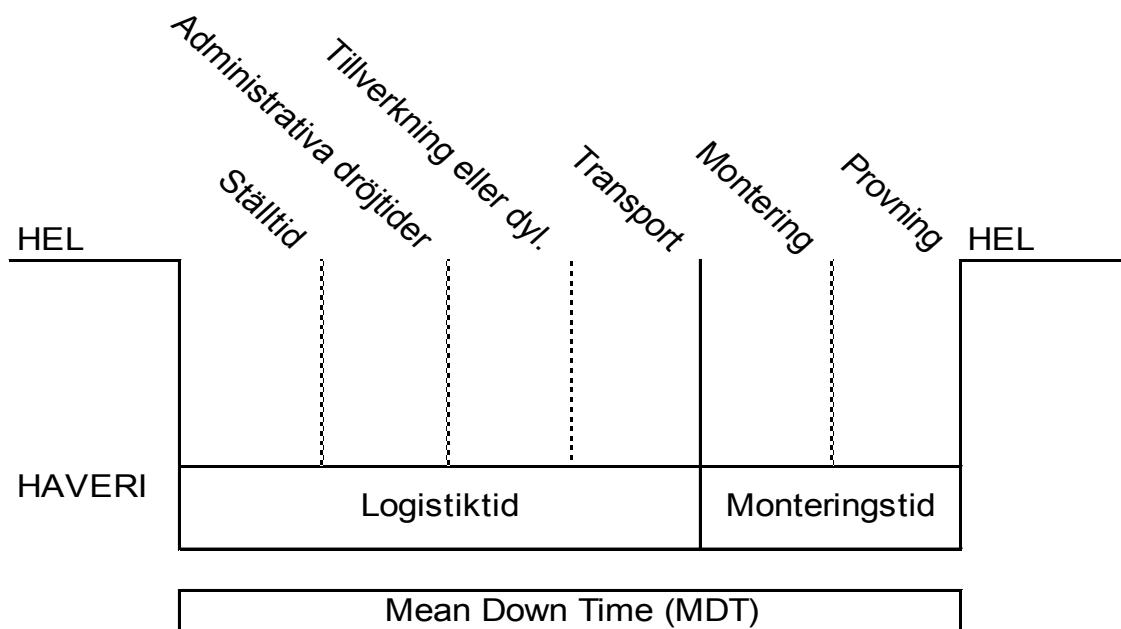
- Inköpskostnad för ersättningskomponent. Ersättningskomponent kan köpas av leverantör eller annan kraftproducerande anläggning. I båda fallen antas kostnaden vara komponentens marknadspris. Ersättningskomponenten monteras direkt i anläggningen om reservdel saknades eller läggs i lager om en reservdel monterats i anläggningen vid haveriet. I inköpskostnaden ingår projektering av inköpet, komponentens pris samt transportkostnad.
- Arbetskostnad som innebär personalkostnad per mantimme.
- Antal mantimmar som är det totala antalet arbetstimmar som behövs vid demontering, montering, installation, provning och eventuell haveriutredning av komponenten.

Produktionsbortfallskostnaden är värdet på den förlorade elproduktionen. I den ingår:

- Elpris avser försäljningspriset på el på spotmarknaden. Detta eftersom produktionsbortfallskostnaden ska spegla den förlorade försäljningen.
- Logistiktid avser tiden det tar från haveriet till att ersättningskomponenten är på plats för montering. Om ersättningskomponenten finns tillgänglig i lager på området eller anskaffas från annat kärnkraftverk motsvarar logistiktiden transport från lager. Då komponenten måste beställas från leverantör motsvarar logistiktiden tillverkning och transport. Med valet av termen logistik vill vi betona att hänsyn inte endast tas till den effektiva transport- eller

tillverkningstiden utan hela den faktiska tiden som kan innefatta ställtid i logistikkedjan och administrativa dröjtider. Vi antar att demontering i de flesta fall klaras av inom logistiktiden, i övriga fall sker demontering under monteringen.

- Moneringstid är tiden det tar från att komponenten står på plats tills att den är monterad, testad och klar för drift. På grund av de höga kvalitetskrav som ställs vid arbeten i kärnkraftverk så utgör dokumentationsrutiner runt exempelvis arbetsorder, inspektion av arbete och godkännande av arbetet en signifikant del av monteringen. Figur 5.2 illustrerar vad som inkluderas i begreppen logistiktid och monteringen.



Figur 5.2 – Kategorisering av logistiktid och monteringen.

- Effekt är anläggningens producerade nettoeffekt. Nettoeffekt är bruttoeffekt, som är den effekt som oftast redovisas, minus den effekt som kärnkraftverket förbrukar under drift. Nettoeffekt används eftersom det är den effekt som säljs till kund och motsvarar produktionsbortfallet vid ett haveri.
- Effektsänkning anger effektreduktionen på hela reaktorblocket vid ett haveri.
- Load factor eller energiutnyttjande anger hur stor del av den teoretiska maxproduktionen under året som utnyttjas. Inbakat i denna siffra finns produktionsbortfall vid revision, coast down, d.v.s. minskad produktion innan revision för maximalt bränsleutnyttjande, och oplanerade stopp. Se Bilaga H för en utförligare förklaring av begreppet load factor.

Rörliga uteblivna produktionskostnader är de kostnader som för varje utebliven producerad kWh sparas in. Dessa kostnader inkluderar bränslekostnader och avgift till svensk kärnbränslehantering (SKB) för omhändertagande av radioaktivt avfall. Det insparade bränslet kan inte till hundra procent användas i framtiden utan en tumregel är att åttio procent kan sparas för framtida användning.

5.3.3 Exkluderade kostnadselement

Nedan redovisas ett antal kostnadselement som vi har valt att inte inkludera i modellen samt motiveringar till varför.

Tidigareläggandekostnad är de ränteintäkter som går miste om då kapital måste bindas i en investering tidigare än beräknat. För att uppskatta kostnaden måste information inhämtas om aktuella investeringsplaner. Vi har valt att inte ta med denna kostnad då den är osäker och kräver omfattande undersökningsarbete. Vi antar att bidraget från denna post skulle vara liten.

Fasta produktionskostnader är till skillnad från rörliga produktionskostnader inte medtagna i beräkningsmodellen. I de fasta kostnaderna ingår exempelvis kostnader för personal, underhåll av anläggningen och avskrivningar. De är alla kostnader som uppstår oavsett mängden producerad el och det är därmed rimligt att anta att de inte påverkas nämnvärt av ett haveri. Om fasta kostnader skulle räknas med skulle de kunna slås ut per producerad kWh.

Fasta kostnader vid stopp eller neddragning av drift består av materialförslitning och administrativa kostnader. Vid nedgång i effekt ändras tryck och temperatur vilket påverkar materialet. Likaså påverkas olika komponenter vid ett eventuellt snabbstopp. Exempelvis skjuts styrtavar in med våldsamt kraft vid ett snabbstopp, vilket kan skapa vibrationer i bränslecellerna och resultera i bränslesprickor som medför att bränslet måste bytas. Enligt Michael Jansson (2006) beräknas inte dessa kostnader. Vid komponenthaveri utreds och dokumenteras förlopp, konsekvenser och åtgärder. Denna dokumentation ska göras tillgänglig för SKI och andra kärnkraftverk världen över. Detta medför administrativa kostnader som skulle kunna ingå i en modell. I denna beräkningsmodell är de emellertid inte med eftersom det administrativa arbetet är svårt att skatta, beror på haveriets art samt att det saknas schabloner för dem (Jansson, 2006).

Förbrukad effekt vid avställd reaktor är den el som anläggningen måste köpa in för kraftförsörjning av olika säkerhetssystem. Vid normal drift producerar kärnkraftverket el för egen förbrukning. Då reaktorn är helt avställd måste anläggningen få strömförsörjning från yttre nät och kostnaden för denna el tar inte modellen hänsyn till. Anledningen till detta är att kostnaden endast uppstår i de fall då anläggningen är helt avställd. Det förväntas att en majoritet av komponenthaverierna endast leder till att en del av produktionen faller bort. Kostnaden kan däremot motiveras för beräkningar för haverier i säkerhetskritiska komponenter då reaktorn måste ställas av p.g.a. förlorade säkerhetsfunktioner.

Rörlig kostnad för ökat slitage på aktivt turbinstråk är tänkbar i fallet där ett turbinstråk tas ur drift varpå det aktiva turbinstråket körs hårdare med ökat slitage som följd. Denna kostnad är rörlig eftersom den beror av återställningstiden för den del av anläggningen som är ur drift. Kostnaden är mycket svår att uppskatta och ingen schablon för denna finns tillgänglig (Axelsson, 2006).

5.4 Ekvationer för kostnadsberäkning

De inkluderade kostnadselementen leder fram till beräkningsmodellens kostnadsekvationer och består av de två huvudkostnadsslagen produktionsbortfall och åtgärdandekostnad samt den mindre kostnadsposten uteblivna rörliga produktionskostnader. Den grundläggande ekvationen för beräkning av konsekvensen är:

$$K = Kp - Kr + Kå \quad (5.1)$$

där:

K – Konsekvenskostnad (kSEK).

Kp – Produktionsbortfallskostnad (kSEK).

Kr – Uteblivna rörliga produktionskostnader (kSEK).

$Kå$ – Åtgärdandekostnad (kSEK).

Den grundläggande formeln skiljer sig något beroende på redundans och om reservdel finns i lager eller inte.

Beräkning av produktionsbortfallskostnaden för ickeredundant respektive redundant komponent görs med olika ekvationer där skillnaden är att sannolikheten för att redundansen är otillgänglig ingår i ekvationen för den redundant komponenten. När redundansen är tillgänglig antas produktionsbortfallet alltid vara noll. De uteblivna rörliga produktionskostnaderna beror av produktionsbortfallets storlek och de beräknas därför analogt med produktionsbortfallet. Skillnaden illustreras av ekvationerna nedan.

Ickeredundanta fallet:

$$K = Kp - Kr + Kå$$

Redundanta fallet:

$$K = (1 - P(\text{redundans tillgänglig})) * (Kp - Kr) + Kå \quad (5.2)$$

där:

$P(\text{redundans tillgänglig})$ – Sannolikhet att redundansen i kretsen är tillgänglig, gäller för 1 av 2, 2 av 3, ..., n-1 av n redundanser.

Skillnaden mellan fallen reservdel i lager och reservdel saknas i lager är att för fallet reservdel i lager multipliceras sannolikheten att reservdelen i lager är tillgänglig med konsekvensen för reservdel i lager. Till detta adderas produkten av sannolikheten att reservdelen i lager inte är tillgänglig och konsekvensen då reservdel saknas i lager. Fallet reservdel saknas i lager beräknas enligt den grundläggande konsekvensformeln (5.1). Eftersom uteblivna rörliga produktionskostnader beror av produktionsbortfallets storlek så beräknas den analogt med produktionsbortfallet. Skillnaden illustreras av formlerna nedan.

Reservdel saknas i lager:

$$K(\text{utan res}) = Kp(\text{utan res}) - Kr(\text{utan res}) + Kå(\text{utan res}) \quad (5.3)$$

Reservdel finns i lager:

$$K(\text{res}) = P(\text{reservdel tillgänglig}) * (Kp(\text{res}) - Kr(\text{res}) + Kå(\text{res})) + (1 - P(\text{reservdel tillgänglig})) * (Kp(\text{utan res}) - Kr(\text{utan res}) + Kå(\text{utan res})) \quad (5.4)$$

där:

$K(\text{res})$ – Konsekvenskostnad med reservdel (kSEK).

$K(\text{utan res})$ – Konsekvenskostnad utan reservdel (kSEK).

$Kp(\text{res})$ – Produktionsbortfallskostnad med reservdel (kSEK).

$Kp(utan\ res)$ – Produktionsbortfallskostnad utan reservdel (kSEK).

$Kå(res)$ – Åtgärdandekostnad med reservdel (kSEK)².

$Kå(utan\ res)$ – Åtgärdandekostnad utan reservdel (kSEK).

$Kr(res)$ – Uteblivna rörliga produktionskostnader med reservdel (kSEK).

$Kr(utan\ res)$ – Uteblivna rörliga produktionskostnader utan reservdel (kSEK).

$P(reservdel\ tillgänglig)$ – Sannolikhet att lagerförd reservdel återfinns och fungerar.

5.4.1 Ekvation för produktionsbortfallskostnad

$$Kp = Pb * Ke \quad (5.5)$$

där:

Kp – Produktionsbortfallskostnad (kSEK)

Pb – Produktionsbortfall (MWh)

Ke – Elpriset (SEK/MWh)

Produktionsbortfallskostnaden beräknas för reservdel finns (res) respektive reservdel saknas (utan res) enligt följande:

$$Kp(res) = Pb(res) * Ke \quad (5.6)$$

$$Pb(res) = (Tl(res) + Tm) * Ef * Es * Lf \quad (5.7)$$

samt:

$$Kp(utan\ res) = Pb(utan\ res) * Ke \quad (5.8)$$

$$Pb(utan\ res) = (Tl(utan\ res) + Tm) * Ef * Es * Lf \quad (5.9)$$

där:

$Pb(res)$ – Produktionsbortfall givet att reservdel finns i lager (MWh).

$Pb(utan\ res)$ – Produktionsbortfall givet att reservdel inte finns i lager (MWh).

$Tl(res)$ – Logistiktid från lager på anläggningen eller anläggningsreservlager (h)

$Tl(utan\ res)$ – Logistiktid för något av fallen (h):

- Anskaffa komponent från annan anläggning
- Forcerat inköp
- Normalt inköp

Tm – Monteringstid (h)

Ef – Effekt (MW)

Es – Effektsänkning (%)

Lf – Load factor (%)

² Se 5.4.2 för skillnad mellan $Kå(res)$ och $Kå(utan\ res)$

5.4.2 Ekvation för åtgärdandekostnad

Åtgärdandekostnaden beräknas för de två fallen reservdel finns (res) samt reservdel saknas (utan res) enligt:

$$Kå(res) = Ki(res) + Ka * Tmh \quad (5.10)$$

$$Kå(utan res) = Ki(utan res) + Ka * Tmh \quad (5.11)$$

där:

$Ki(res)$ – Inköpskostnad i fallet att reservdel används och ska ersättas (kSEK).

$Ki(utan res)$ – Inköpskostnad i fallet att reservdel inte finns vilket gör att forcerat inköp kan vara aktuellt (kSEK).

Ka – Arbetskostnad (SEK/h).

Tmh – Antal mantimmar för demontering, montering, installation, provning samt eventuell haveriutredning av komponent (h).

5.4.3 Ekvation för uteblivna rörliga produktionskostnader

Den uteblivna rörliga produktionskostnaden beräknas för de två fallen reservdel finns (res) samt reservdel saknas (utan res) enligt:

$$Kr(res) = Krör * Pb(res) \quad (5.12)$$

$$Kr(utan res) = Krör * Pb(utan res) \quad (5.13)$$

där:

$Krör$ – Rörlig produktionskostnad (SEK/MWh).

5.4.4 Konsekvensklassberäkningar

Ekvationerna beskrivna ovan resulterar i fyra konsekvensklassberäkningar enligt de fyra konsekvensklasserna beskrivna i figur 4.5. Konsekvenserna 1-4; K1-K4 beräknas enligt:

$$K1 = (1 - P(\text{redundans tillgänglig})) * ((P(\text{reservdel tillgänglig}) * (Kp(res) - Kr(res)) + (1 - P(\text{reservdel tillgänglig}) * (Kp(utan res) - Kr(utan res)))) + P(\text{reservdel tillgänglig}) * Kå(res) + (1 - P(\text{reservdel tillgänglig})) * Kå(utan res)$$

$$K2 = (1 - P(\text{redundans tillgänglig})) * (Kp(utan res) - Kr(utan res)) + Kå(utan res)$$

$$K3 = P(\text{reservdel tillgänglig}) * (Kp(res) - Kr(res) + Kå(res)) + (1 - P(\text{reservdel tillgänglig})) * (Kp(utan res) - Kr(utan res) + Kå(utan res))$$

$$K4 = Kp(utan res) + Kå(utan res) - Kr(utan res)$$

5.5 Operationalisering av parametrarna

Parametrarna har delats in i kategorierna globala respektive lokala parametrar. De globala parametrarna är lika för alla konsekvensberäkningar och de lokala anges specifikt för respektive komponent. Parametrarna kan vara skattade av experter, antaganden, schablonvärden eller faktauppgifter.

5.5.1 Globala parametrar

De globala parametrarna är gemensamma för alla konsekvensanalyser.

Schablonparametrar är: elpris, arbetskostnad och rörlig produktionskostnad. De antagna

parametrarna är P(redundans tillgänglig) och P(reservdel tillgänglig). Faktaparametrar är effekt och load factor.

- Effekt (MW): Uppgift om bruttoeffekt finns tillgänglig officiellt för alla typer av kraftverk. Uppgift om nettoeffekt är okomplicerad att ta fram.
- Elpris (SEK/MWh): Elpris är en parameter vars värde varierar över tiden. För en nulägesanalys kan aktuellt elpris användas, annars bör någon schablon om framtida genomsnittliga värden användas.
- Arbetskostnad (SEK/h): Denna parameter kan uppskattas utifrån schablon inom anläggningen eller enligt en generell schablon.
- Load factor (%): Historiska data för denna parameter kan studeras för att ta fram rimligt värde.
- Rörlig produktionskostnad (SEK/MWh): Den rörliga produktionskostnaden kan skattas antingen utifrån information från anläggningen eller på ägarnivå. Val av informationskälla bör göras med hänsyn till beställaren av analysen.
- Annuitetsberäkning: Kalkylräntan och komponentens livslängd bör skattas utifrån beställarens schablon. Tidshorisonten i kalkylen behöver inte nödvändigtvis vara komponentens livslängd.
- P(redundans tillgänglig): Värdet på denna parameter är ett antagande som kan göras av anläggningsspecialister eller utifrån teoretiska resultat.
- P(reservdel tillgänglig): Värdet på denna parameter är ett antagande som kan göras av anläggningsspecialister eller utifrån teoretiska resultat.

5.5.2 Lokala parametrar

För att få bästa möjliga information hanterar modellen för de lokala parametrarna antingen skattningar av ett specifikt värde eller val av ett intervall om skattning av värde ej kan göras. Osäkerheten för parametrarna logistiktid, monterings- och inköpskostnad för ny komponent, och antal mantimmar antas öka med värdet på parametern. Enligt praxis kan logaritmiska skalor användas där intervallen ökar med en faktor tre (Isdal, 2006). Vid beräkning med logaritmiskt intervall används det geometriska medelvärde av intervallets nedre och övre gräns (Isdal, 2006). Parametrarna effektsänkning, forcerat inköp, inköpskostnadsökning och forcerat inköp logistiktidsreduktion anger en andel i procent och då finns det ingen anledning att förvänta sig att osäkerheten på värdet ökar med värdets storlek, vilket motiverar att en linjär skala kan användas i dessa fall. De lokala parametrarna är:

- Antal komponenter på anläggningen (st): Anger hur många komponenter som delar eller skulle komma att dela på en reservdel.
- Reservdelsantal (st): Anger hur många reservdelar som finns i lager.
- Effektsänkning på hela blocket vid haveri (%): Om komponenten inte är redundant anger denna parameter effektsänkningen om komponenten skulle haverera.
- Effektsänkning vid haveri då redundansen inte är tillgänglig (%): Anger effektsänkningen om redundansen hos en redundant komponent av någon anledning inte skulle fungera.

- Logistiktid från lager i kärnkraftverket eller från plats för anläggningsreserv (h): Anger den tid det tar att transportera komponenten från lagret på anläggningen, eller från det lager där kärnkraftverket har komponenten som anläggningsreserv, till rätt plats i anläggningen.
- Logistiktid från annan anläggning (h): Den tid det tar att leta upp komponenten på en annan anläggning och frakta den till kärnkraftverket.
- Logistiktid från leverantör med normal leveranstid (h). Innefattar transporttid, ställtid, administrativa dröjtider och eventuell tillverkningstid.
- Inköpskostnad (kSEK): Anger marknadspriset för en ny komponent inklusive kostnader för transport och administration av inköpet.
- Forcerat inköp logistiktidsreduktion (%): Om det går att forcera den normala leveranstiden anges med hur många procent den kan kortas ned.
- Forcerat inköp inköpskostnadsökning (%): Om det går att forcera leveranstiden anges med hur många procent inköpskostnaden höjs.
- Monteringstid (h): Tiden det tar att demontera den defekta komponenten, montera, installera och prova den nya komponenten samt eventuell haveriutredning.
- Antal mantimmar för montering (h): Det totala antalet timmar det tar för samtliga personer att demontering, montering, provning och eventuell haveriutredning.

Se bilaga A för frågeformuläret där parameterintervall för de lokala parametrarna finns under respektive parameter.

6 Fallstudie på Forsmark

Vi har tillämpat vår modell på 24 komponenter på Forsmark. Kapitlet går igenom hur vi har valt ut komponenterna, de globala parametrarnas värden samt resultat och analys.

6.1 Urval av komponenter och avgränsning av studien

För att välja ut lämpliga komponenter att studera har vi kombinerat tre olika tillvägagångssätt för att minimera de problem som finns behäftade med respektive tillvägagångssätt:

- Med hjälp av erfarna informanter välja ut ett antal system och därtill hörande komponenter som är produktionskritiska.
- Välja ut komponenter från listan över de strategiska reservdelar som köptes in vid byggnationen av Forsmark.
- Rangordna alla lagerhållna strategiska reservdelar utifrån lagervärde per reservdel och därefter välja ut de komponenter som representerar de högsta lagervärdena.

Fördelen med det första tillvägagångssättet är att komponenter studeras oavsett om de finns som reservdelar i lager eller inte. Ytterligare en fördel är att risken att någon betydelsefull komponent, som inte har reservdelar i lager, förbises minskar. Nackdelen är att det krävs en relativt stor system- eller komponentkunskap för att göra en realistisk komponentnedbrytning.

Fördelen med det andra tillvägagångssättet är att analysen innefattar de strategiska reservdelarna, alltså de komponenter som vid byggnationen bedömdes som extra viktiga. Eftersom de alla är inköpta samma år fungerar det att inbördes rangordna komponenter efter lagervärde. Då konsekvensanalysen kan genomföras på den lagerhållna komponenten reduceras problematiken med komponentavgränsning. Nackdelen är att studien då inte innefattar komponenter inköpta i ett senare skede. Det blir även fokus på att optimera lagerhållning av viktiga komponenter vilket inte är denna studies huvudsyfte. En möjlig fara med detta tillvägagångssätt är att anta att de ursprungliga reservdelarna alla köpts in för att de bedömts vara särskilt kritiska. Ett annat möjligt motiv till inköp kan ha varit att Forsmark vid köp av en dyr komponent fått ett bra pris på ytterligare en.

Att välja det tredje tillvägagångssättet är bättre än det andra på så sätt att alla komponenter i lager beaktas. En nackdel är däremot att det aktuella lagervärdet ger en mycket skev bild av komponenternas verkliga inköpskostnad. Eftersom många stora och viktiga komponenter köptes in för många år sedan har de ett lågt aktuellt lagervärde jämfört med senare inköpta mindre komponenter. Att då räkna upp de gamla komponenterna efter något index kommer inte att ge någon rättvisande jämförelse dels eftersom inköpspriserna är konjunkturberoende (Njurling, 2006) och dels för att vissa gamla reservdelar kan ha köpts in till ett fördelaktigt pris som nämndes ovan. Vid sökningar i Forsmarks lagersystem Fenix visade det sig också att komponenterna varken kan listas utifrån inköpspris eller inköpsår.

För att undvika nackdelarna nämnda ovan kombinerades som sagt alla tre tillvägagångssätten genom att utifrån lagerlistorna, som iordningställdes av Britta Johannessson (2006), ta fram produktionskritiska komponenter vilket Bertil Jonsson (2006) hjälpte oss med. Den huvudkomponent som reservdelen är en del av har

studerats för att identifiera relevanta delkomponenter inom samma huvudkomponent. Efter att ett antal intressanta huvudkomponenter med tillhörande delkomponenter på detta sätt tagits fram kompletterades listan med en bedömning av systemkunnig personal. På detta sätt täcks huvuddelen av de viktiga komponenterna in samtidigt som komponentavgränsningen kan göras delvis utifrån reservdelslistan.

I fallstudien ingår endast större komponenter inom system som kan betecknas som produktionskritiska. Hjälpsystem såsom elsystem, signalsystem eller rörsystem ingår inte. Dessa hjälpsystem är kritiska för funktionen hos de komponenter som vi studerat men en svårighet med dessa system är att de inte är avgränsade på ett lika tydligt sätt. Ett hjälpsystem kan försörja flera olika system och det är betydligt mer komplicerat att kartlägga vilka komponenter som påverkas vid bortfall av ett visst hjälpsystem. Problemställningen för dessa komponenter skiljer sig åt från de studerade på det sätt att många likadana hjälpkomponenter är lokaliserade i olika system att konsekvenserna av ett komponenthaveri därmed kan bli olika beroende på komponentens lokalisering i anläggningen.

6.2 Värden för globala parametrar

Här redovisas vilka värden de globala parametrarna tilldelats i fallstudien och varifrån de kommer.

- Effekt (MW): Nettoeffekten har satts till 1000 MW (Bruttoeffekten) – 35 MW (Effektåtgång för att driva anläggningen) = 965 MW (Informationsavdelningen Forsmark, 2006).
- Elpris (SEK/MWh): Elpriset har skattats utifrån en prognos över det framtida elpriset som tagits fram av PDM. Elpriset skattas till 500 SEK/MWh (Attermo, 2006).
- Arbetskostnad (SEK/h): Denna parameter har värdet 700 SEK/h och har skattats utifrån en rimlighetsbedömning gjord av Tor Isdal (2006).
- Load factor (%): Load factor har värdet 87% (Jansson, 2006).
- Rörlig produktionskostnad (SEK/MWh): Schablon från PDM som har värdet 100 SEK/MWh (Attermo, 2006).
- Annuitetsberäkning: Räntan är satt till 8% och livslängden till 20 år (Isdal, 2006).
- P(redundans tillgänglig): Sannolikheten är skattad till 90% och underbyggs med hjälp av Markovberäkningar, se bilaga G.
- P(reservdel tillgänglig): Sannolikheten är skattad till 95% utifrån en rimlighetsbedömning gjord av Tor Isdal (2006).

6.3 Resultat och analys av fallstudier

I detta avsnitt presenteras och analyseras resultaten från de 24 genomförda fallstudierna. Indata för studerade komponenter sorterade på respektive huvudkomponent finns i bilaga A. Först testas vårt tillvägagångssätt vid konsekvenskartläggning av logistiktid genom att skillnaden mellan de tre inköpsalternativen anskaffa från annan anläggning, forcerat inköp och normalt inköp jämförs. Sedan följer rangordning av komponenter som antingen kan ske efter konsekvens eller efter de olika nyckeltal som finns beskrivna i kapitel 4.5.2 *Rangordning utifrån nyckeltal*.

6.3.1 Inköpsalternativ

Om reservdel inte finns i lager, eller finns i lager men är otillgänglig, har kärnkraftverket tre alternativ beträffande hur en ny komponent ska anskaffas: från annan anläggning, forcerat inköp eller normalt inköp. De komponenter som har analyserats har antingen data för två eller alla tre alternativ. Det är viktigt för att få en så realistisk bild som möjligt av situationen så att det mest lönsamma av de tre alternativen väljs för varje komponent innan den populationsjämförande komponentrangordningen görs. Tabell 6.1 visar att alternativet annan anläggning i samtliga fall ger en mindre ekonomisk konsekvens än normalt inköp och forcerat inköp. Vårt tillvägagångssätt att alltid välja annan anläggning då det är möjligt vinner stöd utifrån dessa resultat. Detsamma gäller forcerat inköp som i samtliga fall är bättre än normalt inköp. Det kan dock tänkas att fall kan uppstå då normalt inköp är bättre än forcerat inköp om inköpskostnaden skulle öka stort samtidigt som logistiktiden minskar mycket lite. Om forcerat inköp skulle vara dyrare än normalt inköp behandlas forcerat inköp som om det inte är möjligt, d.v.s. att definitionen av forcerat inköp är att det ska resultera i en mindre ekonomisk konsekvens än normalt inköp. De resultat som presenteras i nedanstående avsnitt utgår från att vi i första hand har valt alternativet annan anläggning, i andra hand forcerat inköp och i sista hand normalt inköp. I de fall då endast normalt inköp är möjligt används således detta.

Komponent	Normalt inköp (NI) (kSEK)	Forcerat inköp (FI) (kSEK)	Annan anläggning (AA) (kSEK)
412-Ångreglerventil	2 571 482	1 807 400	759 268
412-Rotor	2 623 117	2 368 975	287 763
412-Generatorlager	218 136	155 532	78 534
412-Oljepump	2 619 372	2 364 822	141 511
431-Härvor (10)	280 307	176 232	77 908
431-Rotor	2 630 354	884 465	104 735
431-Vattenföringsdon	736 342	221 591	7 881
431-Stator	2 699 317	2 493 347	221 419
431-Matare	2 565 018	2 332 043	74 342
611-Pol	2 552 339	-	46 567
612-Huvudtransformator	6 065 545	3 158 762	-
759-Kompressor	73 854	59 167	-
Komponent	Differens NI och FI (kSEK)	Differens NI och AA (kSEK)	Differens FI och AA (kSEK)
412-Ångreglerventil	764 082	1 812 214	1 048 132
412-Rotor	254 142	2 335 354	2 081 212
412-Generatorlager	62 604	139 602	76 998
412-Oljepump	254 550	2 477 861	22 23 311
431-Härvor	104 075	202 399	98 324
431-Rotor	1 745 889	2 525 619	7 79 730
431-Vattenföringsdon	514 751	728 461	2 13 710
431-Stator	205 970	2 477 898	22 71 928
431-Matare	232 975	2 490 676	22 57 701
611-Pol	-	2 505 772	-
612-Huvudtransformator	2 906 783	-	-
759-Kompressor	14 687	-	-

Tabell 6.1 – De tre inköpsalternativen med differenser vid konsekvens utan reservdel.

6.3.2. Rangordning efter konsekvens

Den konsekvens som antagligen är mest intressant att rangordna komponenterna efter är nuvarande konsekvens eftersom den anger konsekvens för aktuell anläggningskonfiguration. Den nuvarande konsekvensen innebär något av fallen reservdel finns, vilket inkluderar en sannolikhet att reservdelen är otillgänglig, eller reservdel saknas. Rangordning av de två hypotetiska fallen konsekvens med reservdel och konsekvens utan reservdel analyseras för de komponenter som vi bedömer att det tillför analysen något. Exempelvis har 20 av de 24 komponenterna reservdel i lager vilket medför att det inte är intressant att rangordna samtliga dessa komponenter eftersom konsekvens med reservdel då dessa sammanfaller med nuvarande konsekvens. Däremot kan det vara intressant att analysera om och i så fall hur rangordningen förändras om reservdel inte finns eftersom detta visar den inherenta konsekvensnivån av haveri givet att ingen konsekvensreducerande åtgärd tillämpas.

6.3.2.1 Rangordning efter nuvarande konsekvens

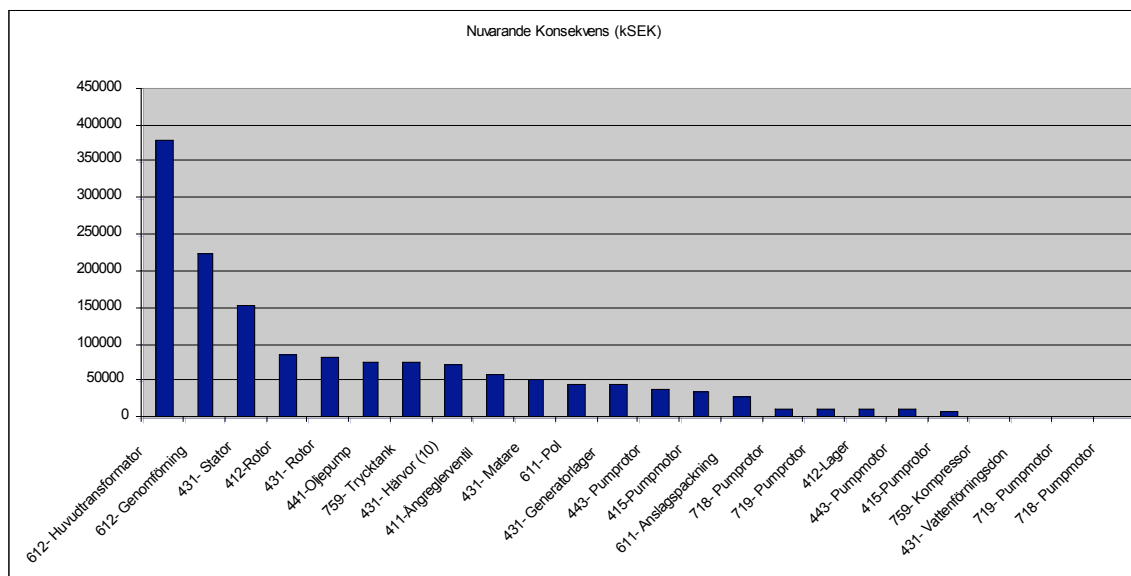
Den nuvarande konsekvensen för de 24 komponenter som vi har studerat går från 381,7 till 1,5 MSEK, vilket tabell 6.2 visar. Tre komponenter utmärker sig särskilt: 612-Huvudtransformator, 612-Genomförning samt 431-Stator. Haveri i de två förstnämnda innebär en effektsänkning på 100% under en lång tid vilket ger en hög ekonomisk

konsekvens trots att reservdel finns. Inköpskostnaden är högre och logistiktiden är längre för 612-Huvudtransformator än för 612-Genomförning vilket resulterar i en skillnad i konsekvens på nästan 160 MSEK. 431-Stator har reservdel och de främsta orsakerna till den höga ekonomiska konsekvensen är en inköpskostnad på 80 MSEK och en förhållandevis lång monterings tid med 50% effektsänkning. Samtliga komponenter förutom fyra har reservdel. De som saknar reservdel är 415-Pumpmotor, 611-Pol, 611-Anslagspackning och 659-Trycktank. Forsmark planerar att investera i en reservdel till 415-Pumpmotor.

Komponent	Nuvarande konsekvens (kSEK)
612-Huvudtransformator	381 657
612-Genomförning	226 476
431-Stator	155 284
412-Rotor	86 794
431-Rotor	84 349
441-Oljepump	75 924
759-Trycktank	75 082
431-Härvor (10)	71 862
411-Ångreglerventil	61 370
431-Matare	54 087
611-Pol	46 507
431-Generatorlager	45 208
443-Pumprotor	38 598
415-Pumpmotor	35 703
611-Anslagspackning	28 334
718-Pumprotor	13 804
719-Pumprotor	13 552
412-Lager	13 001
443-Pumpmotor	11 747
415-Pumprotor	9 410
759-Kompressor	3 311
431-Vattenföringsdon	2 021
718-Pumpmotor	1 553
719-Pumpmotor	1 553

Tabell 6.2 – Rangordning efter nuvarande konsekvens.

Figur 6.1 visar att det är sju komponenter som har en nuvarande konsekvens på 54-87 MSEK, sedan följer fyra komponenter med en konsekvens kring 40 MSEK som följs av ett antal komponenter med en ekonomisk konsekvens under 30 MSEK.



Figur 6.1 – Nuvarande konsekvens.

6.3.2.2 Rangordning efter konsekvens utan reservdel

Eftersom tjugo av komponenterna har reservdel kan det vara intressant att studera hur stor den ekonomiska konsekvensen skulle vara utan reservdel. Rangordningen av komponenterna efter konsekvens utan reservdel åskådliggörs i tabell 6.3. 612-Huvudtransformator har i detta hypotetiska fall en konsekvens på drygt tre miljarder kronor. I tabell 6.3 visas även differensen mellan alternativen konsekvens utan reservdel och konsekvens med reservdel.

Vi ser att komponenterna 411-Ångreglerventil samt 431-Generatorlager nu placerar sig betydligt högre upp på listan. 411-Ångreglerventil har en ovanligt lång logistiktid från annan anläggning. 431-Generatorlager kan inte anskaffas från annan anläggning eller genom forcerat inköp utan måste anskaffas genom normalt inköp. Det kan vidare vara värt att notera att den samlade inköpskostnaden för en reservdel till samtliga ovanstående komponenter är 305 289 kSEK vilket mer än väl bekostas av ett enda haveri på 612-Huvudtransformator.

Komponent	Konsekvens utan reservdel (kSEK)	Konsekvensdifferens utan-med reservdel (kSEK)
612-Huvudtransformator	3 157 754	2 776 097
612-Genomförning	1 610 551	1 384 075
411-Ångreglerventil	759 262	697 892
431-Generatorlager	743 100	697 892
443-Pumprotor	659 046	620 448
412-Pumprotor	287 702	200 908
718-Pumprotor	252 438	238 634
719-Pumprotor	252 185	238 634
431-Stator	220 813	65 529
443-Pumpmotor	193 199	181 452
441-Oljepump	141 451	65 527
415-Pumprotor	108 609	99 199
431-Pumprotor	104 544	20 195
412-Lager	78 528	65 527
431-Härvor (10)	77 717	5 854
759-Trycktank	75 082	69 789
431-Matare	74 281	20 195
759-Kompressor	59 147	55 837
611-Pol	46 507	5 854
415-Pumpmotor	35 703	28 614
611-Anslagspackning	28 334	10 703
718-Pumpmotor	21 366	19 813
719-Pumpmotor	21 366	19 813
431-Vattenföringsdon	7 875	5 854

Tabell 6.3 – Rangordning efter konsekvens utan reservdel med konsekvensdifferens utan-med reservdel.

6.3.2.3 Rangordning efter konsekvens med reservdel

De fyra komponenter som saknar reservdel skulle ha en konsekvens med reservdel enligt tabell 6.4. Vid en jämförelse med tabell 6.2, rangordningen för nuvarande konsekvens, inses att den enda komponenten som skulle ändra position i rangordningen om en reservdel finns tillgänglig är 415-Pumpmotor som då faller sex positioner i rangordningen.

Komponent	Konsekvens med reservdel (kSEK)	Konsekvensdifferens utan-med reservdel (kSEK)
611-Pol	40 653	5 854
611-Anslagspackning	17 630	10 703
415-Pumpmotor	7 089	28 614
759-Trycktank	5 293	69 789

Tabell 6.4 – Rangordning efter konsekvens med reservdel med konsekvensdifferens utan-med reservdel.

6.3.3 Rangordning efter nyckeltal

6.3.3.1 Konsekvensökning per dygn

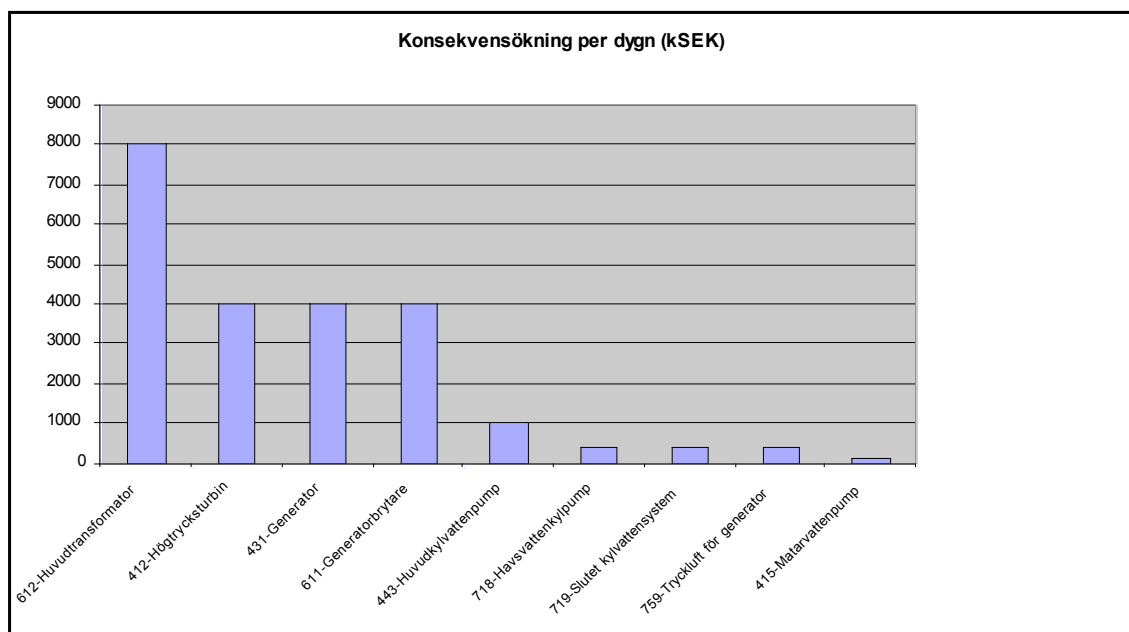
De komponenter som har samma effektsänkning vid haveri har även samma konsekvensökning per dygn. Tabell 6.5 visar rangordningen för konsekvensökning per dygn för varje huvudkomponent, d.v.s. hur mycket de rörliga kostnaderna (produktionsbortfallskostnad minus uteblivna rörliga kostnader) ökar per dygn. I topp

hamnar 612-Huvudtransformator eftersom ett haveri i denna eller dess delkomponent 612-Genomförning resulterar i 100% effektsänkning. De fyra sista huvudkomponenterna i listan är redundanta vilket kan ses genom att deras konsekvens är en tiondel av konsekvensen för ickeredundanta komponenter med motsvarande effektsänkning. Att konsekvensökningen per dygn för redundanta komponenter är en tiondel av konsekvensökningen för ickeredundanta komponenter beror på att P(redundans tillgänglig) är satt till 90%.

Huvudkomponent	Konsekvensökning per dygn (kSEK)	Effektsänkning (%)
612-Huvudtransformator	8060	100
412-Högtrycksturbin med hjälpsystem 411 & 441	4030	50
431-Generator	4030	50
611-Generatorbrytare	4030	50
443-Huvudkylvattenpump	1048	12,5
718-Havsvattenkylpumpar	403	50
719-Slutet kylvattensystem	403	50
759-Tryckluftssystem för generator	403	50
415-Matarvattenpump	165	20,5

Tabell 6.5 – Rangordning efter konsekvensökning per dygn för varje huvudkomponent där de fyra sista huvudkomponenterna är redundanta (effektsänkning för dessa är då redundansen inte är tillgänglig).

I figur 6.2 syns skillnaden i konsekvensökning per dygn mellan de nio huvudkomponenterna.



Figur 6.2 – Konsekvensökning per dygn för varje huvudkomponent.

6.3.3.2 Konsekvensreduktion per investerad krona

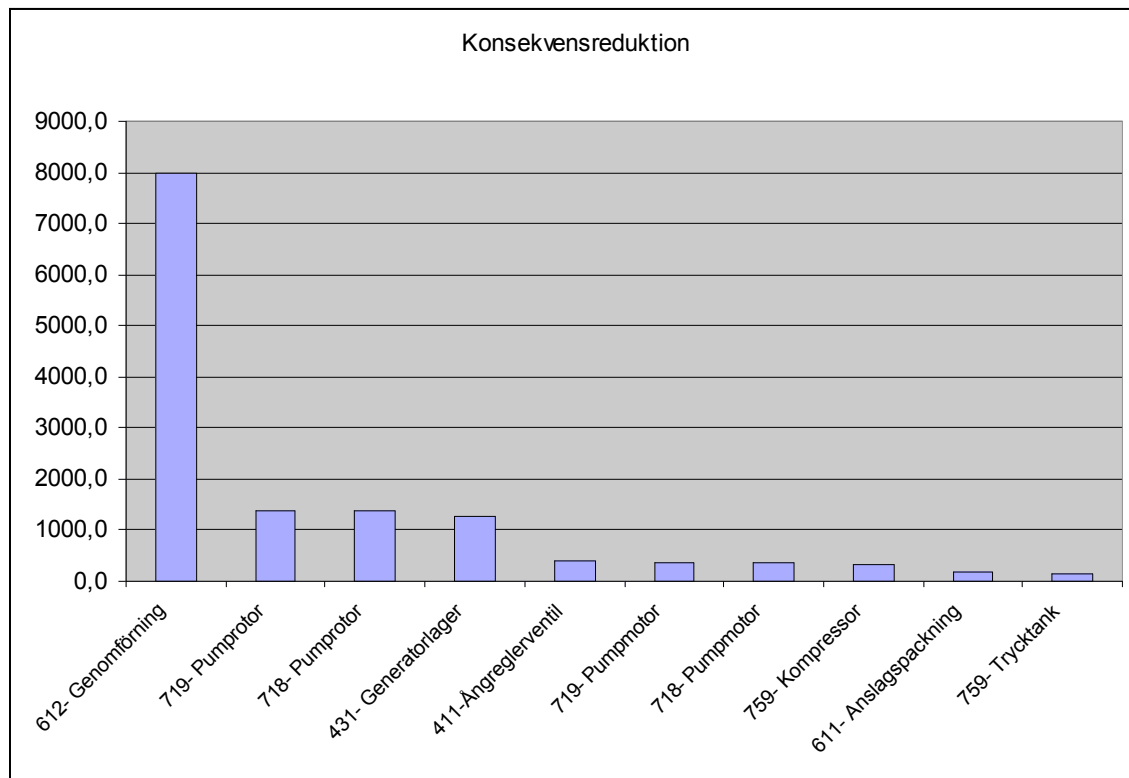
Tabell 6.6 visar att 612-Genomförning ger den högsta konsekvensreduktionen, högre än för 612-Huvudtransformator eftersom inköpskostnaden för 612-Genomförning bara är

100-300 kSEK jämfört med 50 000 kSEK för huvudtransformatorn. De komponenter som ger en liten konsekvensreduktion bör generellt inte ha någon reservdel. En konsekvensreduktion mindre än ett innebär en förväntad förlust, d.v.s. på varje investerad krona är den förväntade konsekvensreduktionen mindre än en krona. Fyra av de studerade komponenterna har en konsekvensreduktion mindre än ett. Detta beror främst på att skillnaden mellan logistiktid för reservdel i lager och logistiktid ej i lager är liten då alla fyra går att anskaffa från annan anläggning.

Komponent	Konsekvensreduktion
612-Genomförning	8000,4
719-Pumprotor	1379,4
718-Pumprotor	1379,4
431-Generatorlager	1274,2
411-Ångreglerventil	402,9
718-Pumpmotor	362,2
719-Pumpmotor	362,2
759-Kompressor	328,5
611-Anslagspackning	195,3
759-Trycktank	127,4
443-Pumprotor	113,3
431-Vattenföringsdon	106,8
443-Pumpmotor	104,8
612-Huvudtransformator	55,5
441-Oljepump	37,8
412-Lager	37,8
412-Rotor	36,7
415-Pumprotor	24,8
431-Härvor (10)	10,7
415-Pumpmotor	5,2
431-Stator	0,8
431-Matare	0,7
611-Pol	0,3
431-Rotor	0,3

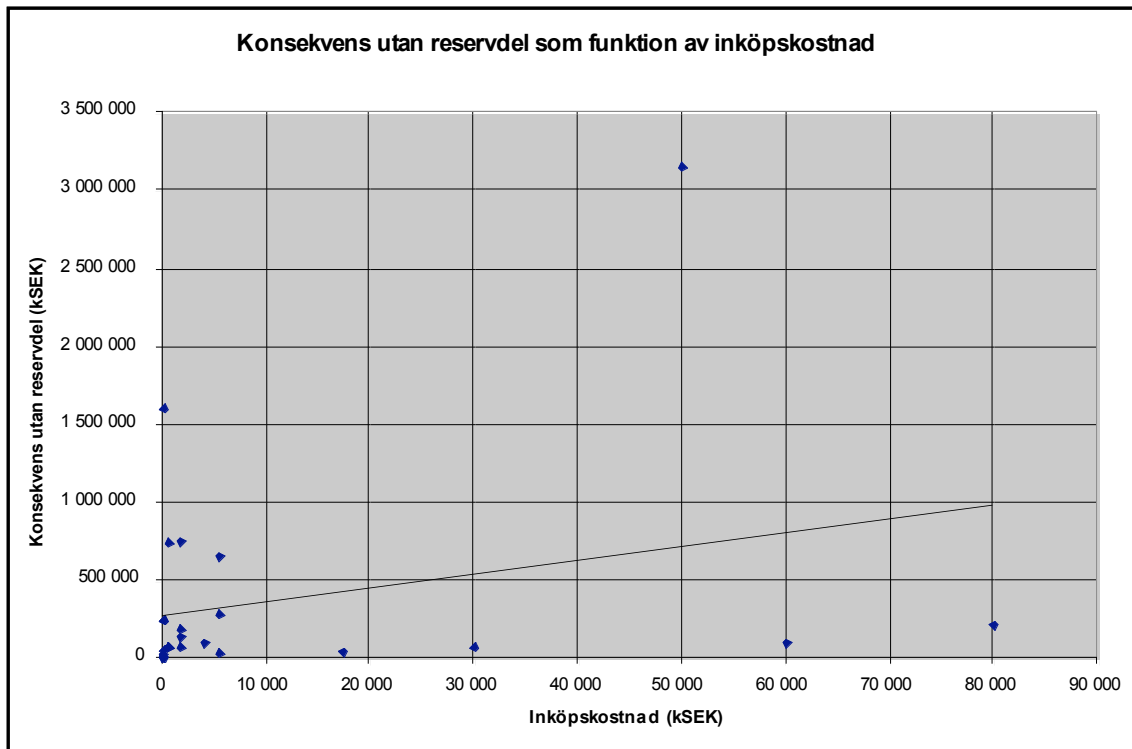
Tabell 6.6 – Rangordning efter konsekvensreduktion per investerad krona.

Figur 6.3 illustrerar de tio komponenter som har störst konsekvensreduktion per investerad krona.



Figur 6.3 – Konsekvensreduktion per investerad krona för de tio komponenter som har störst konsekvensreduktion.

Figur 6.4 visar konsekvens utan reservdel som funktion av inköpskostnaden. Generellt kan sägas att komponenter som ligger högt upp i vänstra delen av diagrammet bör ha reservdel då de har en hög konsekvens och en låg inköpskostnad. Komponenter som har en liten konsekvens och en liten inköpskostnad ses i diagrammet i nedre vänstra hörnet. Vissa av dessa komponenter kan det vara lönsamt att ha reservdel till, vilket kan undersökas noggrannare genom att kombinera tabell 6.6 och figur 6.4. Vidare är det tveksamt om komponenter som befinner sig långt ner till höger i figur 6.4 bör ha reservdel i lager eller inte. Trendlinjen i diagrammet visar att det finns en svag korrelation mellan hög inköpskostnad och hög konsekvens utan reservdel.



Figur 6.4 – Konsekvens utan reservdel som funktion av inköpskostnad.

6.3.3.3 Brytpunkt $P(\text{reservdelsefterfrågan})$

Tabell 6.7 visar rangordningen för $P_{\text{BRYT}}(\text{reservdelsefterfrågan})$ för tidsperioden $T = 20$ år. För att det ska vara lönsamt att ha komponenten i lager ska $P_{\text{ANL}}(\text{reservdelsefterfrågan})$ vara större än $P_{\text{BRYT}}(\text{reservdelsefterfrågan})$. $P_{\text{BRYT}}(\text{reservdelsefterfrågan})$ för de fyra sista komponenterna, från 431-Stator till 431-Rotor, är över 90% och det är mycket troligt att $P_{\text{ANL}}(\text{reservdelsefterfrågan})$ kommer att ligga under detta värde, d.v.s. att reservdelen inte kommer att användas under dess livslängd och därmed vara olönsam att lagrhålla. Däremot kan det anses mer troligt att $P_{\text{ANL}}(\text{reservdelsefterfrågan})$ för de övriga komponenterna kommer att vara större än $P_{\text{BRYT}}(\text{reservdelsefterfrågan})$, vilket innebär att det är lönsamt att ha reservdel i lager.

Komponent	$P_{BRYT}(\text{reservdelsefterfrågan})$
612- Genomförning	0,002%
719- Pumprotor	0,018%
411-Ångreglerventil	0,032%
718- Pumprotor	0,037%
431- Generatorlager	0,040%
719- Pumpmotor	0,070%
611- Anslagspackning	0,087%
443- Pumprotor	0,112%
443- Pumpmotor	0,121%
718- Pumpmotor	0,140%
759- Kompressor	0,155%
759- Trycktank	0,266%
412-Lager	0,336%
431-Vattenförningsdon	0,476%
415-Pumprotor	0,682%
431- Härvor (10)	0,791%
612-Huvudtransformator	0,913%
441-Oljepump	1,337%
412-Rotor	1,379%
415-Pumpmotor	3,197%
611- Pol	39,483%
431- Stator	46,298%
431- Matare	53,071%
431- Rotor	77,977%

Tabell 6.7 – Rangordning efter $P_{BRYT}(\text{reservdelsefterfrågan})$.

6.3.3.4 Brytpunkt MTBF

Tabell 6.8 visar rangordningen för $MTBF_{BRYT}$. Lönsamhetskriteriet är att $MTBF_{BRYT}$ ska vara mindre än $MTBF_{ANL}$ för att det ska löna sig att lagrhålla en reservdel. För komponenter som står högt upp på listan, d.v.s. har ett högt $MTBF_{BRYT}$, lönar det sig troligen att ha reservdel då $MTBF_{ANL}$ troligen är lägre än $MTBF_{BRYT}$ för dessa. Motsatt gäller att för komponenter som står långt ner på listan och som har ett lågt $MTBF_{BRYT}$ lönar det sig antagligen inte att ha reservdel i lager eftersom det kan antas att $MTBF_{ANL}$ är högre än $MTBF_{BRYT}$.

Komponent	MTBF _{BRYT} (år)
612- Genomförning	942 594
719- Pumprotor	108 344
411-Ångreglerventil	63 296
718- Pumprotor	54 172
431- Generatorlager	50 042
719- Pumpmotor	28 450
611- Anslagspackning	23 012
443- Pumprotor	17 796
443- Pumpmotor	16 467
718- Pumpmotor	14 225
759- Kompressor	12 899
759- Trycktank	7 506
412-Lager	5 943
431-Vattenförningsdon	4 195
415-Pumprotor	2 922
431- Härvor (10)	2 517
612-Huvudtransformator	2 180
441-Oljepump	1 486
412-Rotor	1 441
415-Pumpmotor	615
611- Pol	40
431- Stator	32
431- Matare	26
431- Rotor	13

Tabell 6.8 – Rangordning efter MTBF_{BRYT}.

6.3.4 Analys av rangordning av konsekvens och nyckeltal

Utifrån de olika rangordningarna av konsekvenser och nyckeltal kan ett antal samlade slutsatser dras kring de åtgärder som bör vidtas. Rangordning av nuvarande konsekvens, se tabell 6.2, visar att ett femtontal komponenter utmärker sig. Dessa komponenter har alla reservdel i lager men Forsmark bör arbeta med att säkerställa att dessa reservdelar är tillgängliga vid behov samt kontrollera och eventuellt förstärka andra konsekvensreducerande åtgärder. Rangordningen av konsekvens utan reservdel, se tabell 6.3, ger en bild av konsekvensernas storlek givet att inga konsekvensreducerande åtgärder vidtas. Genom att addera konsekvenserna för samtliga komponenter kan en total konsekvensnivå för anläggningen tas fram. Rangordningen av nyckeltalet konsekvensökning per dygn, se tabell 6.6, ger en annan vinkling till problemet eftersom den enbart visar konsekvensens rörliga kostnader. För de huvudkomponenter som ligger i topp av denna lista är det extra viktigt att logistik- och monteringsstid minimeras. Dessa tre rangordningar visar tillsammans att de huvudkomponenter med tillhörande delkomponenter som bör fokuseras på är 612-Huvudtransformator, 431-Generator och 412-Högtrycksturbin med hjälpsystem 411 & 441.

Rangordningarna av nyckeltalen konsekvensreduktion, P_{BRYT} (reservdelsefterfrågan) och MTBF_{BRYT} ger en indikation över vilken lagerhållning som är optimal. Den samlade slutsatsen är här att det är troligt att det är lönsamt att ha reservdelar till de flesta av de 24 komponenterna med tydligt undantag för 431-Rotor, 611-Pol, 431-Matare och 431-Stator. Utan att ha uttalat sig om rimliga nivåer för MTBF_{ANL} är det svårt att dra mer

detaljerade slutsatser, exempelvis angående 415-Pumpmotor som ligger precis ovanför de ovan nämnda fyra komponenterna. I bilaga I genomförs analys av lagerstrategi utifrån ett gemensamt stipulerad MTBF_{ANL} på 500 år. Enligt denna analys skulle det vara lönsamt, om än med liten marginal, att köpa in 415-Pumpmotor som reservdel.

6.4 Känslighetsanalys

För att identifiera vilka parametrar i modellen som har störst inverkan på resultatet och därmed är känsligast för fel i indata så analyserades modellens känslighet. Detta gjordes genom att beräkna ett alternativt värde på den nuvarande konsekvensen genom att i tur och ordning öka några intressanta parametrar med en viss faktor. Endast de parametrar som kan antas innehålla betydande osäkerheter varierades med en känslighetsfaktor angiven i tabell 6.9. Känslighetsfaktorerna grundas på den känsla för varje parameters osäkerhet som vi fått genom genomförda intervjuer. Observera att syftet med denna känslighetsanalys är att identifiera kritiska parametrar och inte att i första hand testa modellens kvalitet. Genom att variera varje parameter med samma faktor hade en sådan analys kunnat genomföras. Utifrån analysen som genomförts är det emellertid möjligt att göra en bedömning om modellen ger rimliga resultat, d.v.s. att parametrar som bör ha stort genomslag har det.

Parameter	Känslighetsfaktor
Elpris	1,5
Arbetskostnad	1,1
P(reservdel tillgänglig)	1,025
P(redundans tillgänglig)	1,05
Logistiktid från lager	1,5
Logistiktid från annat kärnkraftverk	1,5
Logistiktid leverantör	1,5
Inköpskostnad	1,5
Forcerat inköp – logistiktidsreduktion	1,2
Forcerat inköp – inköpskostnadsökning	1,2
Monteringstid	1,5
Mantimmar montering	1,5

Tabell 6.9 – Utvalda parametrars känslighetsfaktorer.

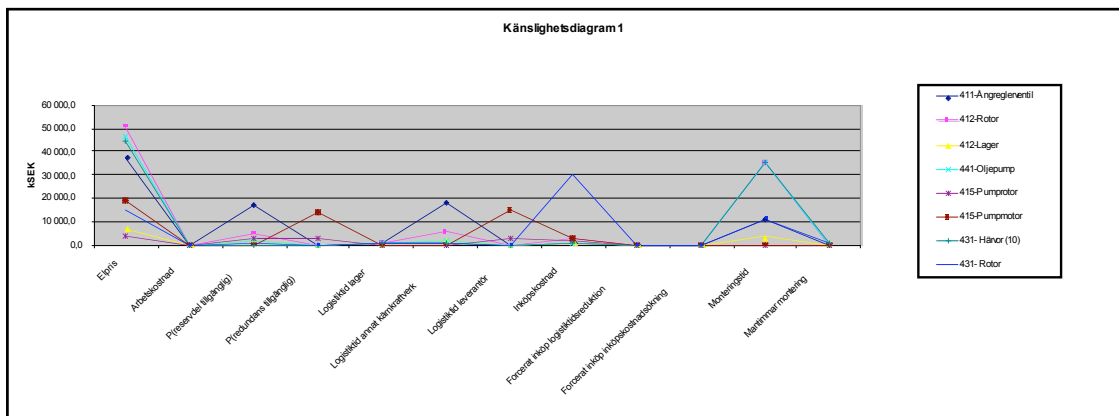
Sannolikhetsparametrarnas känslighetsfaktorer valdes för att passa antagandet om att parametrarnas osäkerhet ligger inom %-enhetsintervallen:

- P(reservdel tillgänglig): 92,5%-97,5%
- P(redundans tillgänglig): 85%-95%

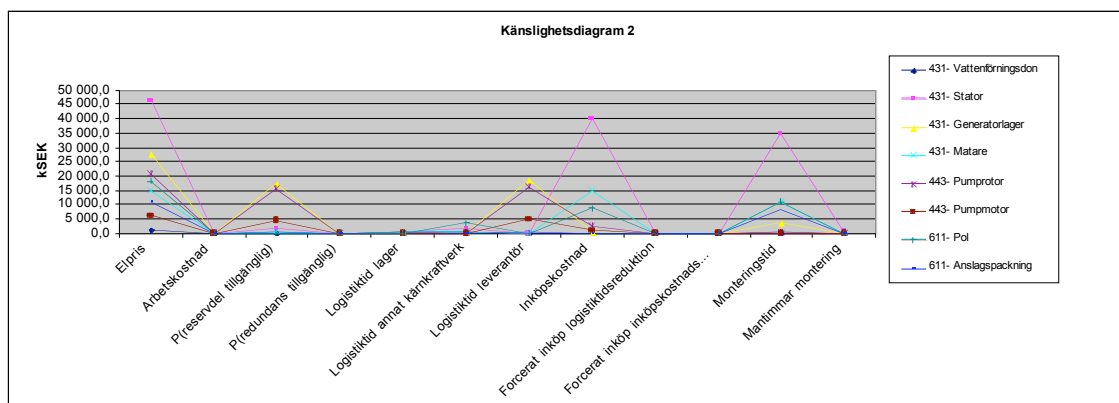
Parametrarna load factor och effektsänkning analyserades inte eftersom de är faktauppgifter och inte skattningar. Parametern rörliga produktionskostnader analyseras inte eftersom osäkerheten anses vara låg samt att de utgör en liten kostnadspost i den ekonomiska konsekvensen.

I nästa steg skapades ett diagram för differensen mellan den alternativa och ursprungliga konsekvensen. I detta diagram visas vilka parametrar som påverkar konsekvensen i störst utsträckning samt för vilka komponenter de olika parametrarna spelar stor eller liten roll. Y-axeln visar hur mycket konsekvensen ökar i kSEK om

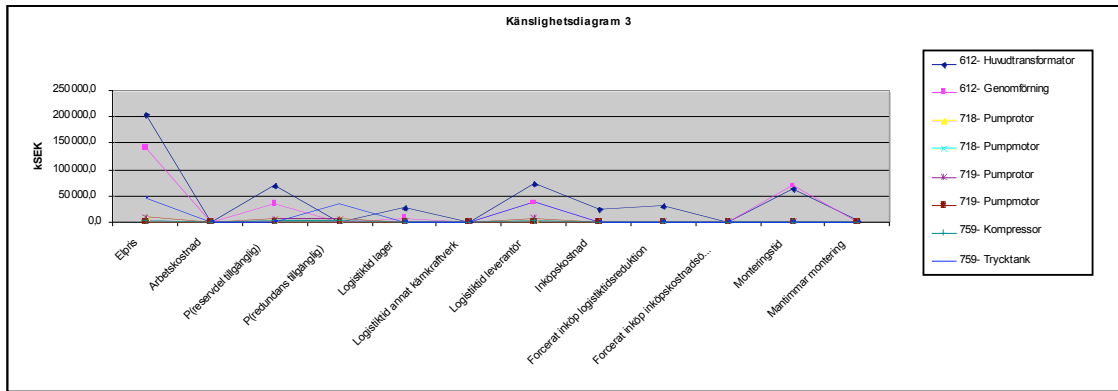
parametern på x-axeln multipliceras med känslighetsfaktorn i tabell 6.9. Ett förväntat resultat är att de komponenter som har den största konsekvensen också har de parametrar som slår igenom störst i känslighetsanalysen. Ett alternativ till att plotta differensen mellan det alternativa och ursprungliga värdet är att dividera differensen med konsekvensen för komponenten. Ett sådant diagram skulle visa vilka parametrar som har störst relativ påverkan på konsekvensen. Fördelen med vår lösning är att den presenterar de viktigaste parametrarna för det absoluta resultatet vilket överensstämmer bättre med syftet att beräkna ekonomisk konsekvens och rangordna utifrån absoluta ekonomiska tal. För tydligheten skall presenteras resultaten för de 24 komponenterna fördelat över de tre diagrammen figur 6.5-6.7.



Figur 6.5 – Känslighetsdiagram 1.



Figur 6.6 – Känslighetsdiagram 2.



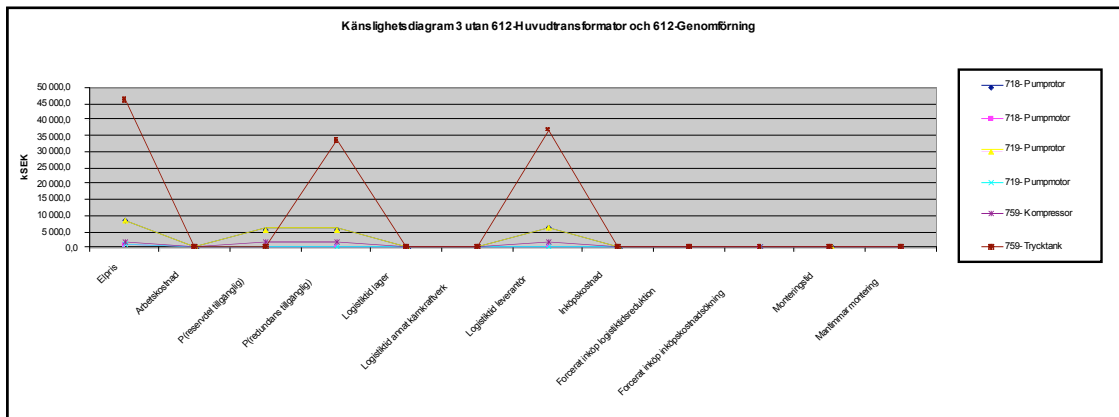
Figur 6.7 – Känslighetsdiagram 3.

Vid jämförelse mellan hur variering av värdet på respektive parameter påverkar konsekvensen är det viktigt att tänka på att vissa parametrar utesluter varandra och inte samtidigt kan ge utslag för samma komponent. Dessa parametrar är:

- P(reservdel tillgänglig) och P(redundans tillgänglig) utesluter varandra för alla komponenter som tillhör konsekvensklass 2-4.
- Logistiktid annan anläggning och logistiktid leverantör utesluter varandra eftersom modellen räknar med det bästa alternativet för logistiktid annan anläggning, forcerat inköp och normalt inköp enligt händelseträdslagiken i kapitel 4.2.1.
- Parametern forcerat inköp logistiktidsreduktion ger utslag tillsammans med logistiktid normalt inköp för de komponenter där forcerat inköp är möjligt.
- Parametern forcerat inköp inköpskostnadsreduktion ger endast utslag i de fall där forcerat inköp är möjligt i analogi med punkten ovan.

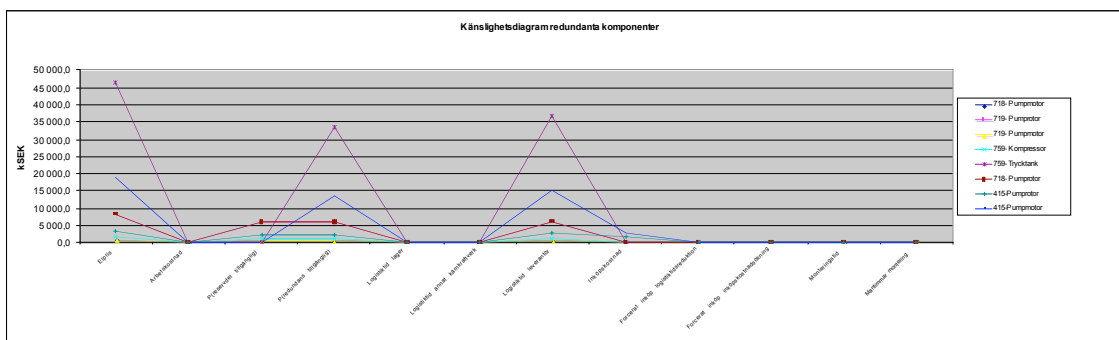
En direkt iakttagelse i figur 6.7 är att 612-Huvudtransformator och 612-Genomförning är extrema i jämförelse med de andra komponenterna. Parametrarna med störst känslighet för dessa komponenter är elpris, P(reservdel tillgänglig), logistiktid från leverantör och monteringstid. Att dessa parametrar har större genomslag för 612-Huvudtransformator och 612-Genomförning än för andra komponenter beror antagligen på en kombination av att de är de enda komponenterna för vilka haveri medför en effektsänkning på 100%, att de kräver längre montering samt att de har längre logistiktider då de är de enda komponenterna som finns som anläggningsreserver.

För att bättre kunna jämföra de andra komponenterna mellan diagrammen togs 612-Huvudtransformator och 612-Genomförning bort från figur 6.7. Det nya diagrammet visas nedan som figur 6.8.



Figur 6.8 – Känslighetsdiagram 3 utan 612-Huvudtransformator och 612-Genomförning.

Vid en jämförelse mellan komponenterna i figurerna 6.5, 6.7 och 6.8 framträder parametern elpris som den parameter som vid förändring påverkar konsekvensen mest. Den är med något undantag den känsligaste parametern för alla komponenter. Andra viktiga parametrar är P(reservdel tillgänglig), logistiktid leverantör, inköpskostnad och monteringstid. Även P(redundans tillgänglig) är viktig för de redundanta komponenterna. Detta syns tydligare i figur 6.9 som endast jämför de redundanta komponenterna mot varandra. De parametrar som är mest okänsliga är arbetskostnad, logistiktid från lager, logistiktid annat kärnkraftverk (med undantag för 411-Ångreglerventil), forcerat inköp (både logistiktidsreduktion och inköpskostnadsminskning) och mantimmar montering. Se kapitel 7.2 för en diskussion om hur osäkerheterna hos de känsliga parametrarna kan hanteras.



Figur 6.9 – Känslighetsdiagram med de redundanta komponenterna.

6.5 Osäkerhetsanalys i Crystal Ball

Resultaten i kapitel 6.2 användes som underlag när ett antal komponenter valdes ut för en mer ingående osäkerhetsanalys i programverktyget Crystal Ball. Genom Monte Carlo-simulering går det att uttala sig om konsekvensens storlek utifrån en statistisk säkerhetsnivå. Komponenterna som valdes ut till denna körning är:

- 612-Huvudtransformator eftersom det är komponenten med störst konsekvens
- 431-Generatorlager eftersom den utifrån känslighetsdiagrammen är representativ för många icke-redundanta komponenter

- 415-Pumpmotor eftersom den utifrån känslighetsdiagrammen är representativ för många redundanta komponenter

De globala parametrarna tilldelades samma osäkerhetsfördelningar för alla tre analyser. Den enda skillnaden mellan analyserna rörande de globala parametrarna är att 612-Huvudtransformator och 431-Generatorlager använder parametern $P(\text{reservdel tillgänglig})$ medan 415-Pumpmotor istället använder parametern $P(\text{redundans tillgänglig})$. Fördelningens typvärde är det geometriska medelvärdet av intervallet i de fall då ett intervall valts. Om informanten angett en skattning är detta det geometriska medelvärdet. De globala parametrarnas osäkerhetsfördelningar är:

- Elpris: triangelfördelad med minvärde: 250, typvärde: 500 och maxvärde: 750.
- $P(\text{reservdel tillgänglig})$: triangelfördelad med minvärde: 90%, typvärde: 95% och maxvärde: 100%.
- $P(\text{redundans tillgänglig})$: triangelfördelad med minvärde: 85%, typvärde: 90% och maxvärde: 95%.

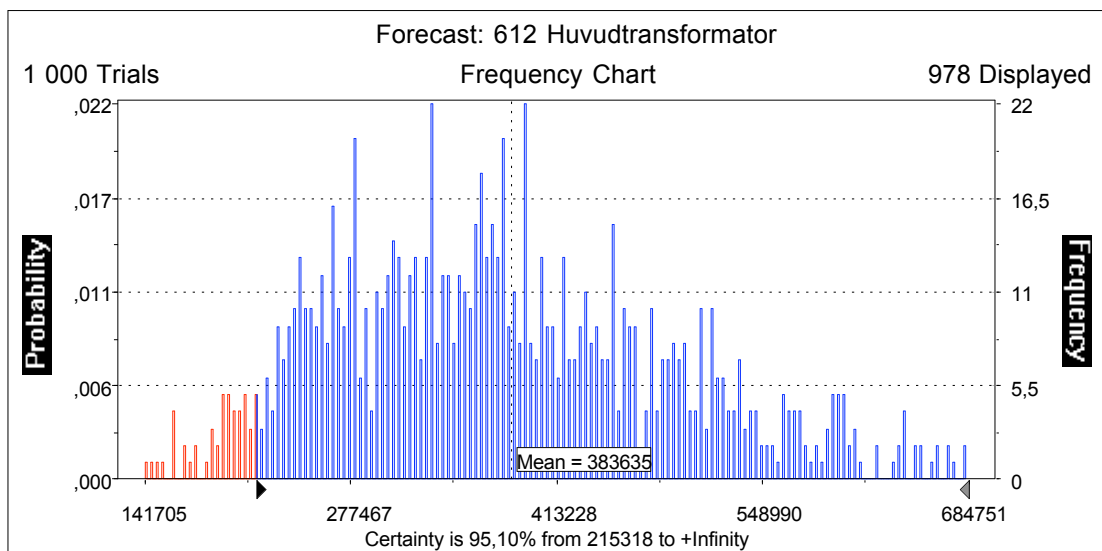
För de lokala parametrarna har principen varit att använda all tillgänglig information för att på bästa sätt approximera osäkerhetsfördelningarna. Värdet hos de parametrar vi analyserat kommer antingen från logaritmiska skalor eller direkta skattningar vilka också kan anses innehålla en logaritmisk osäkerhet (osäkerheten ökar med parametrarnas värde). I enlighet med detta har vi tilldelat dessa parametrar lognormala osäkerhetsfördelningar. För de indata där respondenten valt ett intervall har vi utifrån intervallets nedre och övre gränser samt intervallets geometriska medelvärde, konstruerat en sned triangelfördelning som använts som approximation av en lognormal fördelning. I fallet 612-Huvudtransformator har respondenten skattat ett värde och då har vi utgått från känslighetsfaktorerna för att skatta ungefärliga undre och övre gränser för osäkerhetsfördelningen. Dessa gränser har matchats mot 5% och 95%-kvantilerna för lognormalfördelningen genom att variera standardavvikelsen.

För varje studerad komponent redovisas två figurer. Den första figuren visar konsekvensens fördelning med ensidigt minimum-konfidensintervall på 95% och medelvärdet av simuleringen. Den andra figuren är ett känslighetsdiagram som visar vilken parameter som är känsligast, d.v.s. har störst inverkan på beräkningen.

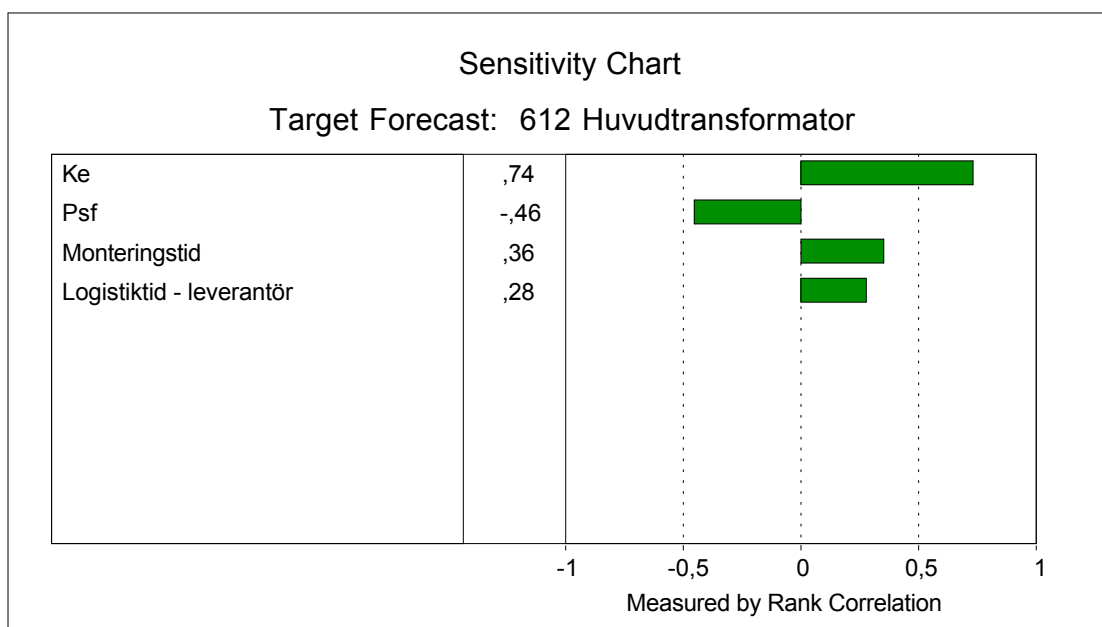
6.5.1 612-Huvudtransformator

Figurerna 6.10 och 6.11 visar resultaten av en simulering i Crystal Ball för 612-Huvudtransformator med följande osäkerhetsfördelningar för lokala parametrar:

- Logistiktid leverantör: lognormal medelvärde: 17520, standardavvikelse: 4000 Percentiler: 5%: 11789, 95%: 24747.
- Monteringstid: lognormal: medelvärde: 384 standardavvikelse: 120 Percentiler: 5%: 221, 95%: 625.



Figur 6.10 – Konsekvensensfördelning för 612-Huvudtransformator.

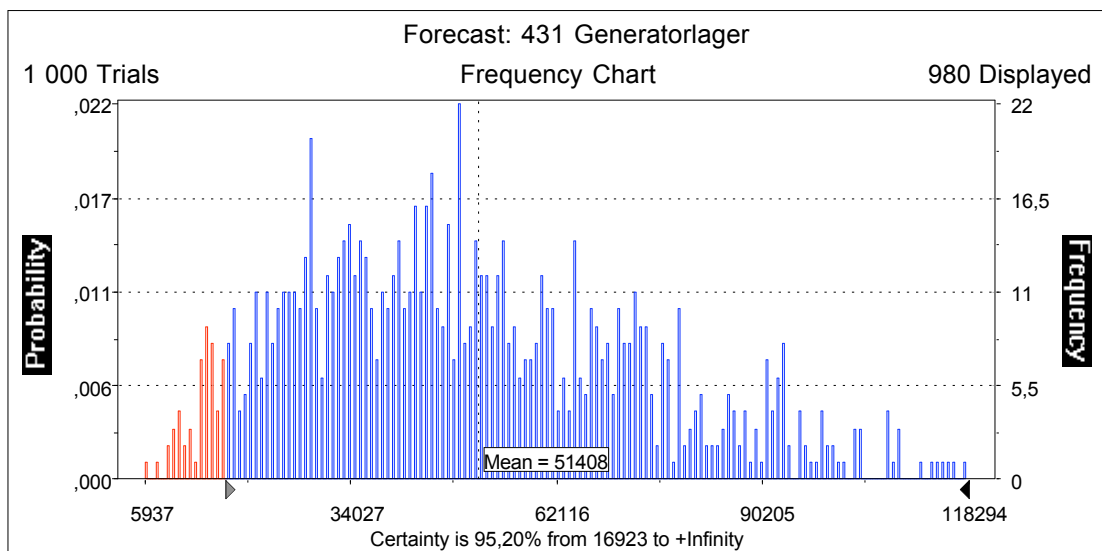


Figur 6.11 – Känslighetsrangordning för 612-Huvudtransformator.

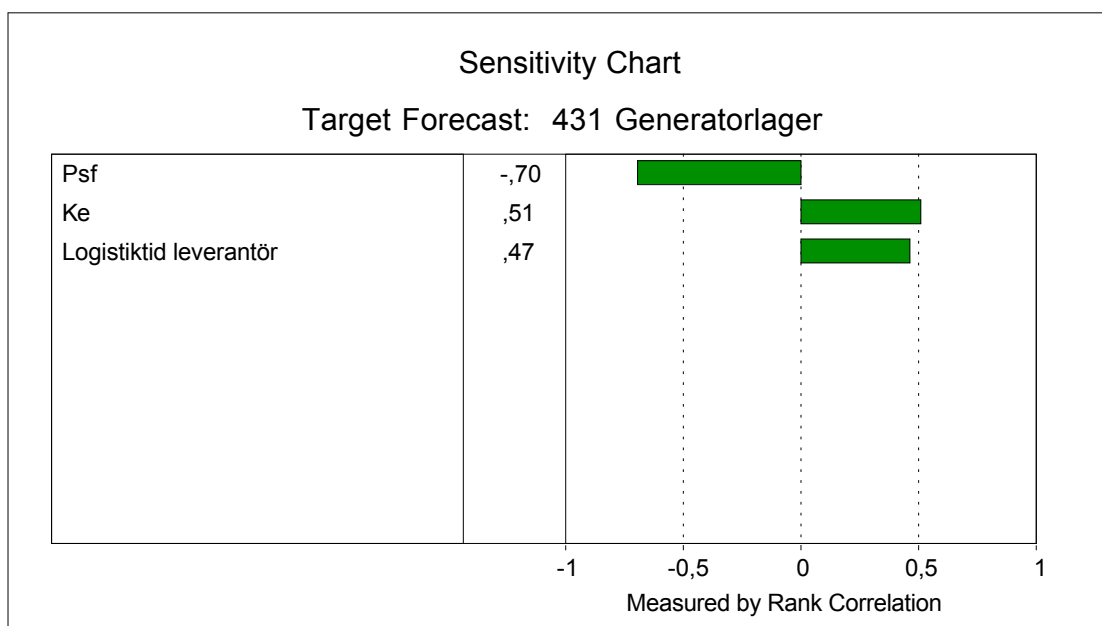
6.5.2 431-Generatorlager

Figureerna 6.12 och 6.13 visar resultaten av en simulering i Crystal Ball för 431-Generatorlager med följande osäkerhetsfördelningar för lokala parametrar:

- Logistiktid leverantör: triangelfördelad med min: 2190, typvärde: 4380 och max: 8760.



Figur 6.12 – Konsekvensensfördelning för 431-Generatorlager.

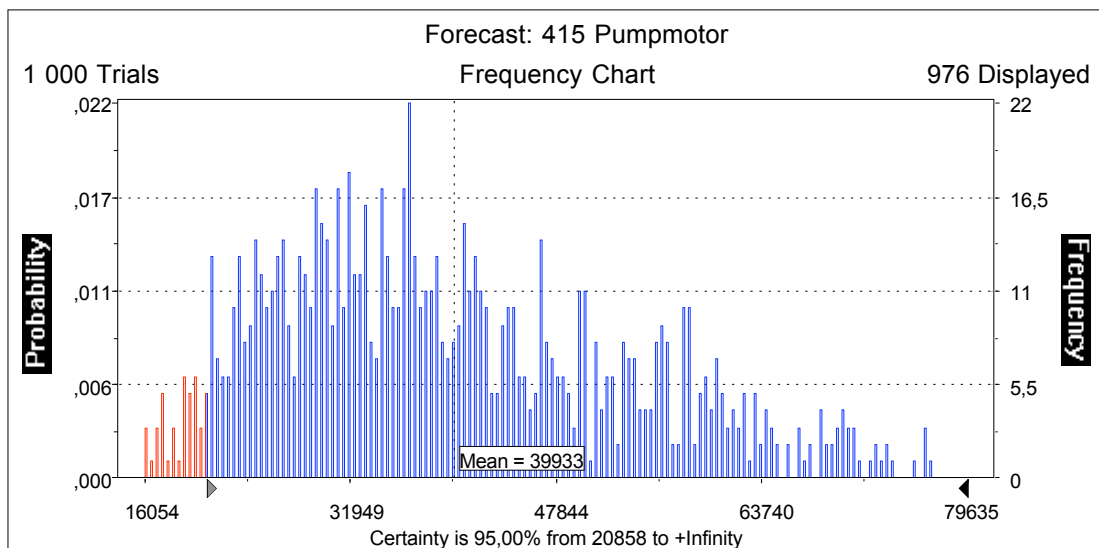


Figur 6.13 – Känslighetsrangordning för 431-Generatorlager.

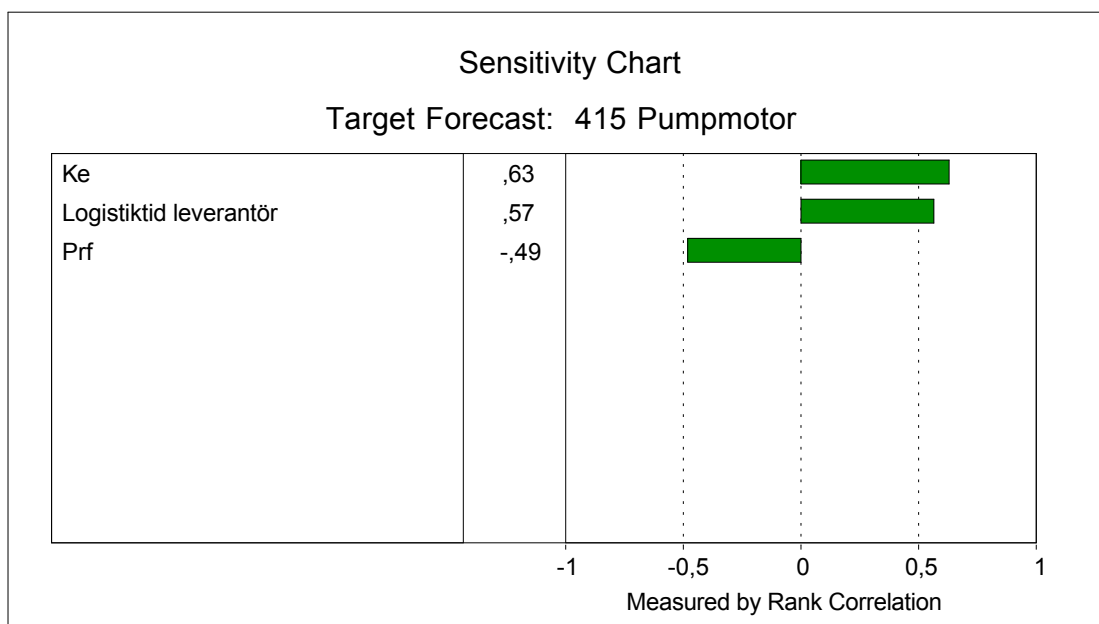
6.5.3 415-Pumpmotor

Figurerna 6.14 och 6.15 visar resultaten av en simulering i Crystal Ball för 415-Pumpmotor med följande osäkerhetsfördelningar för lokala parametrar:

- Logistiktid leverantör: triangel fördelad med min: 2190, typvärde: 4380 och max: 8760.



Figur 6.14 – Konsekvensensfördelning för 415-Pumpmotor.



Figur 6.15 – Känslighetsrangordning för 415-Pumpmotor.

6.5.4 Analys av simuleringar i Crystal Ball

Genom analys i Crystal Ball ges en bättre bild av konsekvensen än det värde som beräkningsmodellen ger. För att se om konsekvensen avviker när hänsyn tas till osäkerheter i vissa av parametrarna jämförs i tabell 6.10 konsekvensen från beräkningsmodellen med medelvärdet av simuleringarna i Crystal Ball.

Komponent	Modellberäkning	Medelvärde simulering	Δ (%)
612-Huvudtransformator	381657	383635	0,52%
431-Generatorlager	45208	51408	13,71%
415-Pumpmotor	35703	39933	11,85%

Tabell 6.10 – Procentuell skillnad i konsekvens beräknad direkt i beräkningsmodell respektive genom medelvärde av simuleringar med beräkningsmodell i Crystal Ball.

Som synes är avvikelsen relativt stor för komponent 431-Generatorlager och 415-Pumpmotor. Även om värden som är resultat av olika stokastiska variabler bör jämföras med försiktighet, så visar tabell 6.10 att den faktiska skillnaden mellan direkt beräkning och medelvärde av många körningar är ungefär lika stor. Av detta kan slutsatsen dras att de relativa felen i konsekvensberäkningarna är större för komponenter med små faktiska konsekvenser. Huruvida en dryg avvikelse på 10 procentenheter mellan tillvägagångssätten är acceptabel eller inte är svårt att uttala sig om men sannolikt påverkas inte rangordningen av komponenterna eftersom avvikelsen inte är korrelerad med konsekvensens storlek i de tre fall vi studerat.

Genom konfidensintervallen i Crystal Ball kan vi uttala oss om konsekvensens storlek på en statistisk säkerhetsnivå. Konfidensintervall har konstruerats för nivåerna 90% och 95%. En jämförelse mellan de undre konfidensintervallgränserna och medelvärdena i tabell 6.11 och 6.12 visar att den undre gränsen för konfidensintervallet för konsekvensen är mellan en tredjedel och hälften av medelvärdet av konsekvensen för 95%-intervallet och mellan 45% och 65% av medelvärdet av konsekvensen för 90%-intervallet. Eftersom 90% är en relativt hög säkerhetsnivå kan det med andra ord sägas att konsekvensen med stor säkerhet åtminstone är hälften av det genomsnittliga värdet.

Komponent	Undre konfidensgräns 95%	Medelvärde simulering	Undre konfidensgräns / Medelvärde (%)
612-Huvudtransformator	215318	383635	56,13%
431-Generatorlager	16923	51408	32,92%
415-Pumpmotor	20858	39933	52,23%

Tabell 6.11 – Procentuell skillnad mellan medelvärdet av simuleringar i Crystall Ball och den undre gränsen för ensidigt 95%-konfidensintervall ($[min; \infty]$).

Komponent	Undre konfidensgräns 90%	Medelvärde simulering	Undre konfidensgräns / Medelvärde (%)
612-Huvudtransformator	247763	383635	64,58%
431-Generatorlager	22958	51408	44,66%
415-Pumpmotor	23638	39933	59,19%

Tabell 6.12 – Procentuell skillnad mellan medelvärdet av simuleringar i Crystall Ball och den undre gränsen för ensidigt 90%-konfidensintervall ($[min; \infty]$).

En jämförelse mellan känslighetsdiagrammen från Crystal Ball-simuleringarna (sensitivity chart) och känslighetsdiagrammen som är konstruerade utifrån känslighetsparametrarna, ger en bild över konsistens i skattningar av osäkerhetsparametrar och osäkerhetsfördelningar. En sådan jämförelse visar på en bra konsistens med avvikelser endast för parametrarna logistiktid leverantör och monterings tid för 612-Huvudtransformator (jmf. Figur 6.6 och 6.11) och parametern P(reservdel tillgänglig) för 431-Generatorlager (jmf. figur 6.6 och 6.13).

Avvikelserna för parametrarna logistiktid leverantör och monterings tid för 612-Huvudtransformator tyder på att vårt tillvägagångssätt att tilldela dessa parametrar osäkerhetsfördelningar resulterar i en lägre osäkerhet än att beräkna känslighet ur

känslighetsparametrarna. Detta kan vara anledningen till avvikelserna mellan konsekvensen beräknad direkt i beräkningsmodellen och medelvärdet av körningarna i Crystal Ball är mindre för 612-Huvudtransformator än de andra komponenterna. Av detta kan slutsatsen dras att anledningen att 612-Huvudtransformator har mindre avvikelse mellan värdena i beräkningsmodellen och Crystal Ball än de andra komponenterna beror på att lognormalfördelningen ger en lägre osäkerhet än den sneda triangelfördelningen.

Avvikelsen för parametern $P(\text{reservdel tillgänglig})$ för 431-Generatorlager beror antagligen på att denna osäkerhetsfördelning tilldelades med marginal. Vi har tidigare nämnt att denna parameter liksom $P(\text{redundans tillgänglig})$ är svår att skatta och analogt med detta är även osäkerheten svår att skatta. Därför bör inte några långtgående slutsatser dras av avvikelserna men ännu en gång bör det betonas att det är två osäkra parametrar som båda har genomslag i konsekvensen.

7 Diskussion kring metodik och modell

Generellt kan sägas att den föreslagna metodiken och beräkningsmodellen med ett litet antal indataposter levererar en stor mängd resultat och jämförelsematerial. Detta material ger en samlad bild av anläggningens totala risknivå samtidigt som den identifierar delar där förbättringar kan göras. Under intervjuerna har informationsinlämnandet inte upplevts som något problem. Endast drygt tio indata lämnas specifikt för varje komponent och då precisa skattningar varit svåra att göra har de fördefinierade skalorna hjälpt respondenterna med skattningar.

Det är en fördel att beräkna konsekvensen först och sedan studera de komponenter som har hög konsekvens. Då behöver inte haverisannolikhet skattas eller beräknas för övriga komponenter vilket kan vara tids- och beräkningskrävande.

Rangordningar av konsekvenser ger en bild över konsekvensnivån i anläggningen vilket är data som kan användas vid prioriteringar mellan investeringar i olika system och komponenter. Genom konsekvenskartläggningen skapas en bild över vilken situation anläggningen skulle befinna sig i vid ett haveri. Sådan information skulle utan alltför stort arbete kunna ligga till grund för detaljerade handlingsplaner för de studerade komponenterna. Utöver handlingsplaner kan även resultaten visa för vilka komponenter konsekvensreducerande åtgärder bör sättas in. Exempel på sådana åtgärder är: säkerställning av status på reservdelar, provkörning av reservdelar samt intensifierad bevakning eller intensifierat underhåll av befintlig komponent.

Utöver examensarbetets syfte, att rangordna komponenter utifrån konsekvens vid haveri, har även ett par analyser utifrån stipulerat $MTBF_{ANL}$ gjorts. De finns bifogade i bilaga I. Dessa analyser är en reservdelsstrategianalys som jämför stipulerat $MTBF_{ANL}$ mot $MTBF_{BRYT}$ och indikerar om strategisk reservdelshållning för aktuell komponent är ok, d.v.s. om reservdel ska köpas in eller om anläggningen har övertalighet. Den andra analysen beräknar stipulerad risk för varje komponent baserat på stipulerat $MTBF_{ANL}$ och nuvarande konsekvens. Genom att summera alla komponenters stipulerade risk fås ett mått över den totala risken i anläggningen. I ett långsiktigt investeringsperspektiv bör det sedan vara högst intressant att minimera den totala risken.

7.1 Jämförelse med Hydra

De grundläggande skillnaderna mellan vår modell och Hydra beror av de olika förutsättningar för data som finns mellan kraftslagen kärnkraft och vattenkraft. Inom vattenkraften finns ett stort antal anläggningar vilket möjliggjort en modell som utifrån mängden av feldata skattar sannolikheter för olika felmoder. Inom kärnkraften finns ett litet antal anläggningar och feldata från anläggningarna är på grund av mycket få komponenthaverier nästan obefintlig. Detta gör att det är svårt att skatta felintensiteter, $MTBF$ eller felsannolikheter. För att ändå kunna angripa problemet har vi i vår modell utgått från att identifiera konsekvenser för komponenthaverier. Principen blir då att närmare granska komponenter med mycket stora konsekvenser för att sedan uttala sig om haverisannolikhet för de komponenter som bedöms relevanta att studera vidare. Detta förfaringssätt kan klassificeras som riskaversivt vilket innebär att haverier med låg sannolikhet och stor konsekvens prioriteras framför haverier med hög sannolikhet och liten konsekvens.

Beträffande konsekvensdelen av anläggningsrisk är vår modell mer detaljerad än Hydra. Exempelvis tillåter den informanterna att lämna exakta skattningar då det är möjligt. Om det inte är möjligt kan informanterna välja ett intervall.

En fördel med vår modell är att den först tar hänsyn till konsekvenser varefter komponenter med stor konsekvens kan analyseras vidare. Att beräkna haverisannolikheter för komponenter som mycket sällan eller aldrig har havererat är tids- och beräkningskrävande och med vår metod behöver det inte göras för alla komponenter. Det kan vara förvillande att bara titta på risk och inte studera haverisannolikheter och konsekvens enskilt. Exempelvis kan två komponenter där den ena har en stor konsekvens och en låg sannolikhet, och den andra en liten konsekvens och en hög sannolikhet ha samma risk. En liten konsekvens och en hög sannolikhet behöver inte resultera i att lika drastiska åtgärder behöver tas som för en komponent med en liten sannolikhet och en stor konsekvens. Det kan därför vara en fördel att först beräkna konsekvens då de mest kritiska komponenterna kan identifieras ur konsekvenssynvinkel och sedan undersökas vidare.

En nackdel med vår modell jämfört med PSA-modellering är att varje komponent studeras avskild från sin omgivning. Detta gör att modellen inte tar hänsyn till beroenden mellan system och komponenter. Det kan ses som en nackdel att vår modell rangordnar komponenterna efter konsekvens vilket inte ger en lika rättvisande bild som att beräkna risk. Modellen kan dock kompletteras med data för haverisannolikheter eller komponenttillförlitlighet. En tredje nackdel med vår modell är att den är dikotom då den enbart hanterar utbyte och inte reparation av havererad komponent. Hydra tar även hänsyn till felmoder som innebär att komponenten kan repareras.

7.2 Hantering av osäkerheter

I kapitel 6.2 visades att ett antal parametrar är känsligare för osäkerheter än andra. Här presenteras ett antal förslag för hur osäkerheten i dessa parametrar kan minskas.

- **Elpris:** Elpriset är den parameter som enligt känslighetsanalysen har störst påverkan på resultatet. Osäkerheten i elpriset kan hanteras genom att antingen uppdatera beräkningarna ofta med aktuellt elpris eller bestämma mot vilken tidshorisont analyserna ska göras och använda aktuella prognoser för motsvarande tidsperiod.
- **P(reservdel tillgänglig):** Parametern är en rimlighetsskattning och vi argumenterar inte för att vår skattning skulle vara bättre än någon annan. Det enda användaren kan göra är att noga överväga skattningen så att denne är tillfreds med skattningen.
- **P(redundans tillgänglig):** Grundat i Markovanalys av redundanta system, se bilaga G, har vi förslagit en skattning för denna parameter men liksom för P(reservdel tillgänglig) bör användaren av modellen noga pröva skattningen utifrån egen information och erfarenhet.
- **Logistiktid leverantör och inköpskostnad:** Genom våra intervjuer har vi förstått att osäkerheten för dessa parametrar är stor eftersom varje inköp innebär en förhandling. Osäkerheten är mindre i de fall då jämförbara komponenter nyligen köpts in. För att bedöma om skattningarna är konsistenta kan svar från olika informanter jämföras om komponenterna är jämförbara. Förutom att fråga olika experter inom kärnkraftverket kan även leverantörer kontaktas. Dessa parametrar är beroende av världskonjunkturen som styr efterfrågan vilket i sin

tur styr leveranstid och pris. Beräkningarna kan därför uppdateras om det finns skäl att tro att läget förändrats p.g.a. konjunktursvängningar eller dylika omvärldsförändringar.

- Monteringstid: För de som kräver en lång monteringstid är denna parameter viktig. Det bör inte vara alltför svårt att uppskatta arbetsinsatsen för arbetet att montera och prova den aktuella komponenten och osäkerheten kan därmed anses vara hanterbar.

En svaghet med modellen är att flera av de skattningar som har gjorts, exempelvis av inköpskostnad och logistiktid, påverkar resultatet i stor utsträckning samtidigt som de är svåra att göra. Tanken med modellen är att den ska vara grov och kunna hantera relativt stora osäkerheter i indata. Modellen är främst avsedd att vara populationsjämförande vilket innebär att fokus bör ligga på att rangordningen är intakt, d.v.s. att rangordningen inte ska vara känslig för förändringar i indata.

8 Slutsatser

Som vi har visat i kapitel 6 *Fallstudie på Forsmark* finns det många möjliga slutsatser som kan dras utifrån metodikens resultat. Nedan följer kort de nyttor med metodiken som vi vill sätta fokus på.

- Komponenter där haveri får stora konsekvenser kan identifieras utifrån nuvarande konsekvens eller konsekvens utan reservdel. Dessa komponenter kan sedan i första hand väljas ut för sannolikhetsbedömning.
- Fallstudien visar att den framtagna modellen är ett enkelt och kraftfullt verktyg för att rangordna komponenter. Med endast drygt tio komponentspecifika indataparametrar möjliggör modellen rangordning och sortering efter konsekvens och nyckeltal på flera sätt.
- Med hjälp av nyckeltalen konsekvensreduktionsfaktor, P_{BRYT} (reservdelsefterfrågan) och $MTBF_{\text{BRYT}}$ fås indikationer om lagerstrategi ur ett lönsamhetsperspektiv.
- Information från konsekvenskartläggningsarbetet ger underlag för åtgärdsplaner vilket bör kunna ge mindre produktionsbortfall.
- Fallstudierna visar på allmänt höga konsekvenser och Monte Carlo-simulering av tre komponenter visar att konsekvenserna med hög säkerhet åtminstone är hälften så stora som de beräknade värdena i modellen.
- I förlängningen är det möjligt att genom stipulerat $MTBF_{\text{ANL}}$ identifiera anläggningens totala risknivå och optimera lagerhållning av reservdelar.

8.1 Vidare arbete

Som redan beskrivits i rapporten är skattning av haverisannolikhet den pusselbit som saknas för att kunna beräkna den ekonomiska risken. Detta kan göras på flera sätt, varav ett återknyter till riskmatrisen i kapitel 3.2 där tre olika osäkerhetsklasser kvalitativt tas fram. Exempelvis kan osäkerhetsklasserna delas in i ”osannolikt”, ”sannolikt” samt ”mycket sannolikt” där experter får skatta varje händelse. Osäkerhetsklasserna kan sedan ges ett beräkningsvärde och kopplas samman med konsekvens för en total riskbedömning. Ett annat sätt är att experter kvantitativt skattar frekvensen av en oönskad händelse, förslagsvis på ett logaritmiskt intervall. Det logaritmiska intervallet tilldelas sedan ett beräkningsvärde, i vårt fall det geometriska medelvärdet. Ett tredje alternativ är att använda empiriska data över oönskade händelser som statistiskt underlag för att bedöma de identifierade händelsernas sannolikhet, se kapitel 2.1. Ett fjärde sätt är att identifiera de händelser som tillsammans eller enskilt leder fram till den oönskade händelsen, se kapitel 3.4 om PSA. Sannolikheten för den oönskade händelsen beräknas sedan med hjälp av sannolikheten för de ingående händelserna.

Valet av tillvägagångssätt bör grundas i vilka data som är tillgängliga samt vilka möjligheter som finns att använda sig av erfarna systemexperter skattningar.

Optimeringsproblemet att välja vilka delar av anläggningen som ska förnyas för att sänka den totala risken så mycket som möjligt per investerad krona är nästa steg i processen efter att haverisannolikhet skattats för komponenterna.

Referenser

Muntliga källor

- Attermo, Pär, 2006, PDM, fortlöpande under examensarbetet.
- Axelsson, Lars, 2006-11-28, VPC, allmän diskussion kring examensarbetet.
- Boeryd, Anders, 2006-09-29, PDM, allmän diskussion kring examensarbetet.
- Engström, Johan, 2006-09-11, VPC, tekniska aspekter rörande kärnkraft.
- Eriksson, Anders, 2006-11-30, FM, huvudkomponent 759-Tryckluft för generator.
- Fernroth, Rolf, 2006-09-19, FM, val av komponenter samt kontaktpersoner.
- Fredriksson, Peter, 2006-10-11, F1, huvudkomponent 612-Huvudtransformator.
- Hjalmarsson, Göran, 2006-11-27, FM, huvudkomponent 611-Generatorbrytare.
- Informationsavdelningen, Forsmark, 2006-09-19.
- Isdal, Tor, 2006, VPC, fortlöpande under examensarbetet.
- Jansson, Michael, 2006, F1, fortlöpande under examensarbetet.
- Jansson, Ola, 2006-11-30, FM, huvudkomponent 759-Trycklyft till generator.
- Johannesson, Britta, 2006-11-08, FM, reservdelslista.
- Jonsson, Bertil, 2006-11-08, F1 drift, val av komponenter.
- Landsåker, Pär, 2006-10-05, F2, effektsänkning.
- Lindgren, Peter, 2006-11-23, F1, huvudkomponent 412-Högtrycksturbin.
- Masman, Fredrik, 2006-12-11, 2006-12-13, FM, huvudkomponenterna 718-Havsvattenkylpumpar och 719-Slutet kylvattensystem.
- Njurling, Göran, 2006, F1, fortlöpande under examensarbetet.
- Persson, Lars-Göran, 2006-09-27, FM, huvudkomponent 612-Huvudtransformator.
- Reinholdsson, Martin, 2006-09-01, PDM, allmän diskussion kring examensarbetet.
- Rundberg, Carola, 2006-10-11, FM, huvudkomponenterna 443-Huvudkylvattenpump samt 415-Matarvattenpump.
- Vikman, Per, 2006-11-24, FM, huvudkomponent 431-Generator.
- Westlund, Karin, 2006-09-27, FM, huvudkomponent 612-Huvudtransformator.
- Wredenberg, Lars, 2006-09-06, VPC, allmän diskussion kring examensarbetet.

Tryckta källor

- Abrahamsson, M., (2002). Uncertainty in quantitative risk analysis: characterisation and methods of treatment. Department of Fire Safety Engineering, Lund Institute of Technology, Lund University, Lund.
- Andreasson, M., (2001). Riskbaserat beslutsunderlag inför reinvesteringar på vattenkraftanläggningar: Modellstruktur och resultat Hydra. Syntell AB.

- Blom, G., (1986). Sannolikhet med tillämpningar. Studentlitteratur, Lund.
- Davidsson, G., (2003). Handbok för riskanalys. Räddningsverket, Karlstad.
- Hellström, P., (2006). Kursmaterial från ”Komplexa system i teknik och samhälle”. Uppsala universitet, Relcon AB.
- IAEA, (2004). International outage coding system for nuclear power plants., IAEA, Wien.
- Isdal, T., (2006b). Riskhantering inom Elproduktion Norden; Delprojekt 2: Anläggningsrisker. Rapport T_CBA06_008, Vattenfall AB.
- Failure Safety Analysis Report. Forsmark 1.
- KSU, (2005). Kraftindustrins grundutbildningspaket (div. kurspärmar). Kärnkraftsäkerhet och Utbildning AB, Nyköping.
- KSU, (2006). Erfarenheter från driften av de svenska kärnkraftverken, Kärnkraftsäkerhet och Utbildning AB, Österbergs & Sörmlandstryck AB, Nyköping.
- KSU, utbildningsmaterial, Så fungerar en kokvattenreaktor, Kärnkraftsäkerhet och Utbildning AB, Nyköping.
- Kumamoto, H., Henley, E. J., (1996). Probabilistic Risk Assessment and Management for Engineers and Scientists, 2nd ed., IEEE Press, New York.
- Larsson, D., (2005). Riskutfall I entreprenadprojekt inom NCC Construction Sverige AB. Examensarbete 2005:192, Institutionen för samhällsbyggnad, Luleå tekniska universitet.
- Nystedt, F., (2000). Riskanalysmetoder. Department of Fire Safety Engineering, Lunds universitet, Rapport 7011, Lund.
- Olsson, U.E., (2005). Kalkylering för produkter och investeringar. Studentlitteratur, Lund.
- Rychlik, I., Rydén, J., (2003). Introduction to Probability and Risk Analysis, Lecture Notes. Lund Institute of Technology, Lund University, Lund.
- SMS, TNC, (1990). Kärnenergiordlista. Utarbetad av Sveriges mekanstandardisering (SMS) i samarbete med Tekniska nomenklaturcentralen (TNC), Stockholm.
- VPC, (2005). Swedpower AB Årsredovisning 2005 (nuvarande namn: Vattenfall Power Consultant AB)
- Wiederheim-Paul, F., (1999) Att utreda, forska och rapportera, Upplaga 6, Liber Ekonomi, Malmö.

Internetbaserade källor

- Forsmark (2006). www.forsmark.se/upload/3/Framtidssatsningar.doc (2006-12-12).
- Svensk energi (2006). www.svenskenergi.se (2006-10-12).
- Vattenfall (2006). www.vattenfall.se (2006-10-12).

Bilaga A Data för analyserade komponenter

Sammanställning huvudkomponenter

	Redundans	Säkerhetsupplägg	Antal genomförda analyser	Andel efteranskning av redundant enhet utifrån tillgänglig	Källa
412 Högtryckssturbin med hjälpsystem 411 & 441	Nei	Nei	4	50%	0%
413 Motor	Nei	Nei	2	20,5%	0%
414 Lager/lagersystem	Nei	Nei	2	0%	0%
441 Hjälpvattenpump	Nei	Nei	2	12,5%	0%
611 Generatorbytare	Nei	Ja	2	50%	0%
612 Huvudtransformator	Nei	Ja	2	100%	0%
718 Hjälpvattenpumpar	Ja	Nei	2	0%	50%
719 Stator	Ja	Nei	2	0%	50%
759 Tryckluftssystem för generator	Ja	Nei	2	0%	50%

Sammanställning delkomponenter

	Antal i drift på F1 och F2	Antal reservdelar	Logistiktid på Forsmark/Anläggnings-täcker	Logistiktid från annat kraftverk	Logistiktid från leverantör med normal leveranstid	Logistiktid från leverantör med förord leveranstid	Inköpskostnad med förord leveranstid	Inköpskostnad	Standardkomp onent kan användas	Leveranstid & inköpskostnad för standardkomponent	Monteringstid	Antal manningar för installation
412 Högtryckssturbin med hjälpsystem 411 & 441												
411 Antriegsventiler	16	1	1-24 h	3-10 min	1-3 år	20-40% kortare	0-25% dyrare	1-3 MSEK	Ja	1-3 år & 300-1000 KSEK	3-10 dygn	10-30 h
412 Rotor	4	1	1-24 h	1-3 min	1-3 år	0-20% kortare	0-25% dyrare	3-10 MSEK	Nei	Gär ej	10-30 dygn	100-300 h
412 Lager/lagersystem	16	1	1-24 h	10-30 dygn	1-3 min	0-20% kortare	0-25% dyrare	1-3 MSEK	Ja	10-30 dygn & 300-1000 KSEK	10-30 dygn	100-300 h
413 Motor												
415 Rotor	12	1	1-24 h	Gär ej	1-3 år	Gär ej	Gär ej	4 MSEK	Nei	Gär ej	1-24 h	100-300 h
415 Stator	12	1	1-24 h	Gär ej	3-12 min	Gär ej	Gär ej	3-10 MSEK	Nei	Gär ej	1-24 h	30-100 h
441 Generator												
431 Rotor	240	19	1-24 h	1-3 dygn	1-3 min	40-50% kortare	100-125% dyrare	30-100 KSEK	Nei	Gär ej	10-30 dygn	300-1000 h
431 Vattenföringssdon	4	2	1-24 h	3-10 dygn	1-3 år	60-80% kortare	50-75% dyrare	60 MSEK	Nei	Gär ej	3-10 dygn	300-1000 h
431 Stator	4	5	1-24 h	1-3 dygn	3-12 min	60-80% kortare	100-125% dyrare	30-100 KSEK	Nei	Gär ej	1-24 h	10-30 h
431 Bytare	4	1	1-24 h	10-30 dygn	1-3 år	0-20% kortare	50-75% dyrare	80 MSEK	Nei	Gär ej	10-30 dygn	1000-3000 h
431 Bytare	4	1	1-24 h	1-3 dygn	3-12 min	0-20% kortare	50-75% dyrare	300-1000 KSEK	Nei	Gär ej	10-30 dygn	100-300 h
443 Hjälpvattenpump												
443 Rotor	16	1	1-24 h	Gär ej	1-3 år	Gär ej	Gär ej	3-10 MSEK	Nei	Gär ej	1-24 h	30-100 h
443 Stator	16	1	1-24 h	Gär ej	3-12 min	Gär ej	Gär ej	1-3 MSEK	Nei	Gär ej	1-24 h	30-100 h
611 Generatorbytare												
611 Pol (en av tre poler levererar)	12	0	1-24 h	Gär ej	1-3 år	Gär ej	Gär ej	10-30 MSEK	Nei	Gär ej	3-10 dygn	100-300 h
612 Huvudtransformator												
612 Huvudtransformator komplett	12	0	1-24 h	Gär ej	3 dygn	Gär ej	Gär ej	30-100 KSEK	Nei	Gär ej	4 dygn	100 h
718 Hjälpvattenpumpar												
718 Rotor	4	1	1-24 h	Gär ej	2 år	40-50% kortare	60-80% dyrare	50 MSEK	Nei	Gär ej	16 dygn	2000 h
718 Stator	4	3	1-24 h	Gär ej	3-12 min	Gär ej	Gär ej	100-300 KSEK	Nei	Gär ej	10-30 dygn	10-30 h
718 Bytare	4	1	1-24 h	Gär ej	1-3 min	Gär ej	Gär ej	30-100 KSEK	Nei	Gär ej	1-24 h	10-30 h
Hjälpvattenpump												
719 Rotor	8	1	1-24 h	Gär ej	1-3 år	Gär ej	Gär ej	100-300 KSEK	Nei	Gär ej	1-3 dygn	30-100 h
719 Stator	8	1	1-24 h	Gär ej	1-3 min	Gär ej	Gär ej	30-100 KSEK	Nei	Gär ej	1-24 h	10-30 h
759 Tryckluftssystem för generator												
759 Kompressor	4	1	1-24 h	Gär ej	3-12 min	20% kortare	0-25% dyrare	170 KSEK	Nei	Gär ej	1-24 h	30-100 h
759 Tryckluft	4	1	1-24 h	Gär ej	3-12 min	Gär ej	Gär ej	300-4000 KSEK	Nei	Gär ej	1-3 dygn	10-30 h

Kommentarer

(1) Renovering av lagrad komponent ingår i monteringstiden.

Figur A.1 – Data för alla i fallstudien ingående delkomponenter uppdelade efter respektive huvudkomponent.

Bilaga B Beskrivning av system och komponenter för genomförda konsekvensanalyser

Här beskrivs de system som studerade komponenter ingår i samt vilka delkomponenter de är uppdelade i. Informationen är hämtad från FSAR om inte annat anges.

412-Högtrycksturbin med hjälpsystem 411 och 441

Systemet omvandlar ångans termiska energi till mekanisk energi för drivning av generatoren. Vidare förser det mellanöverhettaren, lågtrycks- och högtrycksförvärmarna med ånga. Det finns på F1 och F2 två parallella turbinstråk som vardera består av en högtrycksturbin och tre parallellkopplade lågtrycksturbiner. Varje turbin har även ett elmotordrivet baxverk. Ångan kommer genom regler- och snabbstängningsventilerna till högtrycksturbinen. Högtrycksturbinen har fyra ånginlopp, två på översidan och två på undersidan. Från ånginloppen strömmar ångan axiellt, d.v.s. längs med axeln, från turbinens mitt till dess båda ändar där fyra avlopp finns. Avloppen leder ångan till fuktavskiljarna/mellanöverhettaren och därefter till de tre lågtrycksturbiner.

I studien ingår delkomponenterna:

- 411-Ångreglerventil: Regler och snabbstängningsventilerna (V501-V508) är inbyggda i ett gemensamt ventilhus och försedda med gemensamt ventilsäte. De manövreras av varsin servomotor.
- 412-Oljesystem (mekanisk oljepump): Pumpar lageroljan från oljetank till lager.
- 412-Rotor: Roterande axel på vilken skovlarna är fästa.
- 441-Lager/lagersegment: Lagren är av olika typer beroende på var de sitter. Lagren smörjs med olja från ett gemensamt system.

415-Matarvattenpump P001-003

Mavapumpens främsta uppgift är att pumpa vatten till reaktorn. Vatten kommer från kondensatsystemet, värms upp och pumpas av mavapumparna vidare till högtrycksförvärmare och transporteras vidare till reaktorn (Utbildningsmaterial). F1 och F2 har vardera två turbinstråk med tre mavapumpar på varje.

I studien ingår delkomponenterna:

- 415-Pumpmotor
- 415-Pumprotor

431-Generator

Generatoren omvandlar den av turbinen utvecklade mekaniska effekten till elektrisk effekt. Generatoren levererar sedan denna effekt till elnätet samt alstrar och upptar viss reaktiv effekt.

I studien ingår delkomponenterna:

- 431-Stator
- 431-Rotor
- 431-Härvor om 10 stycken
- 431-Generatorlager
- 431-Vattenföringsdon

443-Huvudkylvattenpumpar P1-P4

Huvudkylvattenpumparna pumpar kylvatten in i kondensatorn för att där kondensera ångan från lågtrycksturbinerna till vatten.

I studien ingår delkomponenterna:

- 443-Pumpmotor
- 443-Pumprotor

612-Huvudtransformator T11 och T12

Huvudtransformatorn uppgift är att transformera den från huvudgeneratorerna utmatade effekten från 21.5 kV till 400 kV. Haveri i någon av de två huvudtransformatorerna innebär att även den andra huvudtransformatorn kommer att stängas av. Enligt de säkerhetstekniska föreskrifterna (STF) måste säkerhetssystemen i varje turbin försörjas av redundant kraftmatning oavsett om generatoren i respektive stråk är avställd eller inte. Det är tillåtet att en av dessa kraftmatningar är otillgängliga under max sex timmar. Det innebär att både huvudtransformatorn och 70kV-transformatorn måste vara tillgängliga annars måste nedgång till kall avställd reaktor ske. Slutsatsen blir att man vid vad vi definierar som haveri skulle gå till kall avställd reaktor och förlora 100% av produktionen (Fredriksson, 2006).

I studien ingår delkomponenterna:

- 612-Huvudtransformator: Komplet.
- 612-Genomförning: Genomföringarna på 400 kV sidan är försedda med strömtransformatorer med tre kärnor för skydds- och mätutrustning. På varje transformator finns det tre genomföringar. Vid haveri i en genomförning förlorar hela huvudtransformatorn sin funktion.

718-Hjälpkylvattensystem för turbindelen

Systemets uppgift är att kyla det slutna systemets 719 kylare. Systemet arbetar med saltvatten som cirkuleras av pumparna P1 och P2. En pump arbetar åt gången med den andra som reserv. Om båda pumparna felfungerar kyla inte system 719. Endast pumparna granskas eftersom det är de enda aktiva komponenterna i systemet.

Pumparna består av två delkomponenter:

- 718-Pumpmotor
- 718-Pumprotor

719-Slutet kylvattensystem för turbindelen

Systemets uppgift är att lämna kylvatten till en mängd system inom turbindelen. Cirkulationen av kylvatten ombesörjs av pumparna P1 och P2. En av dessa står i reserv och startar om differenstrycket över pumparna skulle bli för lågt. Systemets vatten kyla av hjälpvattenkylsystemet 718 i kylarna E1-E2. Det utgående vattnet från kylarna håller en konstant temperatur på 22 grader.

I studien ingår delkomponenterna:

- 719-Pumpmotor
- 719-Pumprotor

611-Generatorbrytare

Generatorbrytarens uppgift är att vid fasning sammankoppla generatorn med nätet samt att den utgör bryt- och frånskiljarpunkt vid avställning eller inträffat fel.

Generatorbrytaren består av tre enfasbrytare av tryckluftsförande med forcerad vattenkylning. I frånslaget läge är huvudkontakten sluten och frånskiljaren öppen.

Generatorbrytaren kan manövreras med elektrisk avståndsmanöver alternativt lokal pneumatisk eller elektrisk manöver.

Delkomponenterna som studeras är:

- 611-Pol
- 611-Anslagspackning

759-Tryckluftssystem för generator

Systemets uppgift är att leverera tryckluft till generatorn.

I studien ingår delkomponenterna:

- 759-Kompressor
- 759-Trycktank

Bilaga C Frågeschema

Frågeschemat är konstruerat i Excel, se figur C.1. Till vänster sätter respondenten en etta på valt intervall eller väljer ett eget intervall i rutan till höger. Kontrollrutan i mitten stämmer av så att respondenten inte har fyllt i en etta på flera ställen för varje fråga eller besvarat frågor som utesluter varandra.

Frågeschema

Fråga 1: Komponentnamn och systemnummer:

Svara på frågorna nedan genom att antingen välja ett intervall eller fylla i ett värde i rutan "Eget värde" till höger.

Fråga 2: Hur många likadana komponenter finns det i drift på både F1 och F2?

Antal komponenter i drift:

Fråga 3: Är komponenten del av en redundant krets, dvs. normalt påverkas inte produktionen av haveri på denna komponent?

Ja: Nej:

Besvara en av frågorna nedan:

Om nej, besvara fråga 13.

Om ja, besvara fråga 14.

Fråga 4: Hur stort blir produktionsbortfallet vid komponenthaveri?

Sänkning	0-20%	20-40%	40-60%	60-80%	80-100%
Medel	10%	30%	50%	70%	90%
Markera val med "1"	0	0	0	0	0

Fråga 5: Hur stort blir produktionsbortfallet om redundans inte är tillgänglig?

Bortfall	0-20%	20-40%	40-60%	60-80%	80-100%
Medel	10%	30%	50%	70%	90%
Markera val med "1"	0	0	0	0	0

Fråga 6: Hur många reservkomponenter finns det i lager på Forsmark eller på annan ort?

Antal reservkomponenter:

Logistiktid är effektiv transporttid + administrativ tid + ställtid (monteringsstid ingår inte)

Fråga 7: Hur lång är logistiktiden för reservkomponent i Forsmark eller anläggningsreserv på annan ort?

Logistiktid-lager	1-24 h	1-3 dygn	3-10 dygn	10-30 dygn
Geometriskt medel (h)	4,9	41,6	131,5	415,7
Markera val med "1"	0	0	0	0

Fråga 8: Går det att få tag i ersättningskomponent från något annat kärnkraftverk eller kraftverk?

Ja: Nej:

Om ja, svara på fråga 9.

Fråga 9: Logistiktid från annan anläggning?

Logistid-fra fram	1-3 dygn	3-10 dygn	10-30 dygn	1-3 mån
Geometriskt medel (h)	41,6	131,5	415,7	1264,4
Markera val med "1"	0	0	0	0

Fråga 10: Hur lång är normal logistiktid + ev. tillverkningsstid vid köp av ny komponent hos leverantör?

Logistid-inköp	1-3 dygn	3-10 dygn	1-3 mån	3-12 mån	1-3 år
Geometriskt medel (h)	41,6	131,5	1264,4	4380,0	15172,8
Markera val med "1"	0	0	0	0	0

Fråga 11: Hur stor är inköpskostnaden?

Inköpskostnad	100-300 KSEK	300-1 000 KSEK	1 000-3 000 KSEK	3 000-10 000 KSEK
Geometriskt medel (h)	0,173205	0,547723	1,732051	5,477226
Markera val med "1"	0	0	0	0

Fråga 12: Forcerat inköp: Kan logistiktid + ev. tillverkningsstid reduceras markant med större resursinsats?

Ja: Nej:

Om ja, besvara fråga 13 och 14.

Fråga 13: Hur mycket kan leveranstiden kortas ner?

Sänkning	0-20%	20-40%	40-60%	60-80%	80-100%
Medel (%)	10%	30%	50%	70%	90%
Markera val med "1"	0	0	0	0	0

Fråga 14: Hur mycket höjs inköpskostnaden?

Höjning	0-25%	25-50%	50-75%	75-100%	100-125%
Medel (%)	0,13	37,50	62,50	87,50	112,5
Markera val med "1"	0	0	0	0	0

Fråga 15: Skulle systemet kunna konstrueras annorlunda så att standardkomponent kan användas?

Ja: Nej:

Om ja, Besvara fråga 16 och 17.

Fråga 16: Hur lång är normal logistiktid + ev. tillverkningsstid med standardkomponent?

Tid	1-3 dygn	3-10 dygn	10-30 dygn	1-3 mån	3-12 mån
Markera val med "1"	0	0	0	0	0

Fråga 17: Vad blir inköpskostnaden med standardkomponent?

Inköpskostnad	10-30 KSEK	30-100 KSEK	100-300 KSEK	300-1000 KSEK	1000-3000 KSEK
Markera val med "1"	0	0	0	0	0

Fråga 18: Monteringsstid: Hur lång tid tar det att montera och prova ersättningskomponenten?

Tid	1-24 h	1-3 dygn	3-10 dygn	10-30 dygn
Geometriskt medel (h)	4,9	41,6	131,5	415,7
Markera val med "1"	0	0	0	0

Fråga 19: Hur många mantimmar tar det att montera och prova ersättningskomponenten?

Summa (h)	10-30	30-100	100-300	300-1000	1000-3000
Geometriskt medel (h)	17,3	54,8	173,2	547,7	1732,1
Markera val med "1"	0	0	0	0	0

Figur C.1 – Frågeschema.

Bilaga D Beräkningsmodellen i Excel

Beräkningsmodellen i Excel består av tre kalkylark: Konsekvensmodell, Nyckeltal samt Känslighet. I arket "Konsekvensmodell", se figur D.1, står de globala parametrarna högst upp till vänster med gul färg. Avdelningen under innehåller den informationen som behövs för samtliga parametrar för att beräkna den ekonomiska konsekvensen. Om en ny komponent ska läggas till läggs en ny kolumn till efter den sista komponenten till höger i arket. Därefter genomförs beräkningarna, varav vissa celler är dolda för att göra kalkylbladet tydligare. Kalkylarket "Nykeltal", se figur D.2, hämtar sedan information från "Konsekvensmodell" och lägger det i en lista där varje nyckeltal har en kolumn och varje komponent en rad. Denna lista går sedan att sortera i stigande eller fallande ordning efter den konsekvens eller det nyckeltal som väljs. Här finns också tre diagram: Ett stapeldiagram för den nuvarande konsekvensen, ett stapeldiagram för inköpskostnad och stipulerad risk samt ett diagram med konsekvensen som en funktion av inköpskostnaden. Vid intresse är det lätt att lägga till fler eller förändra dessa diagram. På det tredje kalkylarket "Känslighet", se figur D.3, läggs en känslighetsfaktor till de parametrar som är behäftade med osäkerheter. Överst står de globala parametrarna följt av de komponentspecifika parametrarna. Varje kolumn innehåller en komponent där det nya parametervärdet visas. Hur mycket förändringen av parametern påverkar den ekonomiska konsekvensen plottas sedan i ett av de tre diagrammen. Komponenterna är uppdelade på tre diagram för att det ska vara möjligt att urskilja varje specifik komponent.

Variebel- beteckning	Kostnadsparameter	Dimension	Känslig- hetsfaktor	Värde	Alternativt värde
Ke	Epriset	SEK/MWh	1	500	500
Ef	Effekt	MW	1	965	965
Fl	Load factor	%	1	87%	87%
Ka	Arbetskostnad	SEK/h	1	700	700
Kr	Rörliga prod. kostnader	SEK/MWh	1	100	100
Psf	Samolikhet Reservdel fungerar	%	1	95%	95.0%
Prf	Samolikhet Redundans fungerar	%	1	90%	90%
Tl	Livsångd	år	1	20	20
Ir	Ränta	%	1	8%	8%

Bet.	Komponentnamn	Dimension	Känslig- hetsfaktor	Default- värde	411-Ansgreleverventil	412-Rotor	412-Lager	441-Oljepump	415-Pumpmotor	415-Pumpmotor
Nk	Antal komponenter i drift:	Heltal		8	16	4	16	4	12	12
Lred	Redundant ?	Ja/Nej		1	Ja	Nej	Nej	Nej	Ja	Ja
Ess	Effektsänkning (Bortfall) om ej redundant	%	1	50%	50%	50%	50%	50%	-	-
Esr	Erfi sänkt (Bortfall) om redundans ej tillgänglig	%	1	50%	50%	-	-	-	20.5%	21%
Nes	Antal reservkomponenter:	Heltal		0	0	1	1	1	1	0
Tl(res)	Logistiktid från lager	timmar	1	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9
Lakv	Från annat kärnkraftverk möjligt ?	Ja/Nej		Nej	Ja	Ja	Ja	Ja	Nej	Nej
Tl(ej res)	Logistiktid från annat kärnkraftverk	timmar	1	4.16	4380	1264	415.7	415.7	-	-
Tl(ej res)	Logistiktid leverantör	timmar	1	1264.4	15173	15173	1247.1	15173	15173	4380
Kl(res)	Inköpskostnad	kSEK	1	100.000	1732.051	5477.226	1732.051	1732.051	4000.000	5477.226
Lfor	Forcerat inköp möjligt ?	Ja/Nej		Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Nej	Nej
Ftl	Forcerat inköp - logistiktidreduktion	%	1	50%	30%	10%	30%	10%	-	-
Fkl	Forcerat inköp - inköpskostnadsökning	%	1	100%	12.5%	12.5%	12.5%	12.5%	-	-
Lstd	Standardkomp möjligt?	Ja/Nej		Ja	Ja	Nej	Ja	Nej	Nej	Nej
Tlstd	Logistiktid standardkomp leverantör	kSEK		1-3 dygn	15173	-	10-30 dygn	-	-	-
Kl(std)	Inköpskostnad standardkomp	timmar	1	50.000	547.723	-	547.723	-	-	-
Tm	Monteringsid	arb. tim	1	4.9	131	415.7	41.6	415.7	4.9	4.9
Tmh	Arbetslinnans monteringsid	arb. tim	1	17.3	17.3	173.2	17.3	173.2	173.2	54.7

Bet.	Kostnad	Dimension	Default- värde	411-Ansgreleverventil	412-Rotor	412-Lager	441-Oljepump	415-Pumpmotor	415-Pumpmotor
Kp	Produktionsbortfallskostnad	kSEK	13 372	74 533	101 495	14 071	92 588	6 611	37 734
Kå	Åtgärdsbortfallskostnad	kSEK	212	1 744	5 598	1 744	1 853	4 121	5 516
Kr	Uteblivna rörliga prod. kostnader	kSEK	2 674	14 907	20 299	2 814	18 518	1 322	7 547
		Åtgärd	Forcerat	Från Lager	Från Lager	Från Lager	Från Lager	Från Lager	Inköp
K	Konsekvenskostnad	kSEK	10 910	61 370	86 794	13 001	75 924	9 410	35 703
			Forcerat	Från Lager	Från Lager	Från Lager	Från Lager	Från Lager	Inköp
Kp	Produktionsbortfallskostnad - alternativ	kSEK	13 372	74 533	101 495	14 071	92 588	6 611	37 734
Kå	Åtgärdsbortfallskostnad - alternativ	kSEK	212	1 744	5 598	1 744	1 853	4 121	5 516
Kr	Uteblivna rörliga prod. kostnader - alternativ	kSEK	2 674	14 907	20 299	2 814	18 518	1 322	7 547
		Åtgärd	Forcerat	Från Lager	Från Lager	Från Lager	Från Lager	Från Lager	Inköp
K	Konsekvenskostnad - alternativ	kSEK	10 910	61 370	86 794	13 001	75 924	9 410	35 703
Kp	Produktionsbortfallskostnad - differens	kSEK		0	0	0	0	0	0
Kå	Åtgärdsbortfallskostnad - differens	kSEK		0	0	0	0	0	0
Kr	Uteblivna rörliga prod. kostnader - differens	kSEK		0	0	0	0	0	0
K	Konsekvenskostnad - differens	kSEK		0	0	0	0	0	0

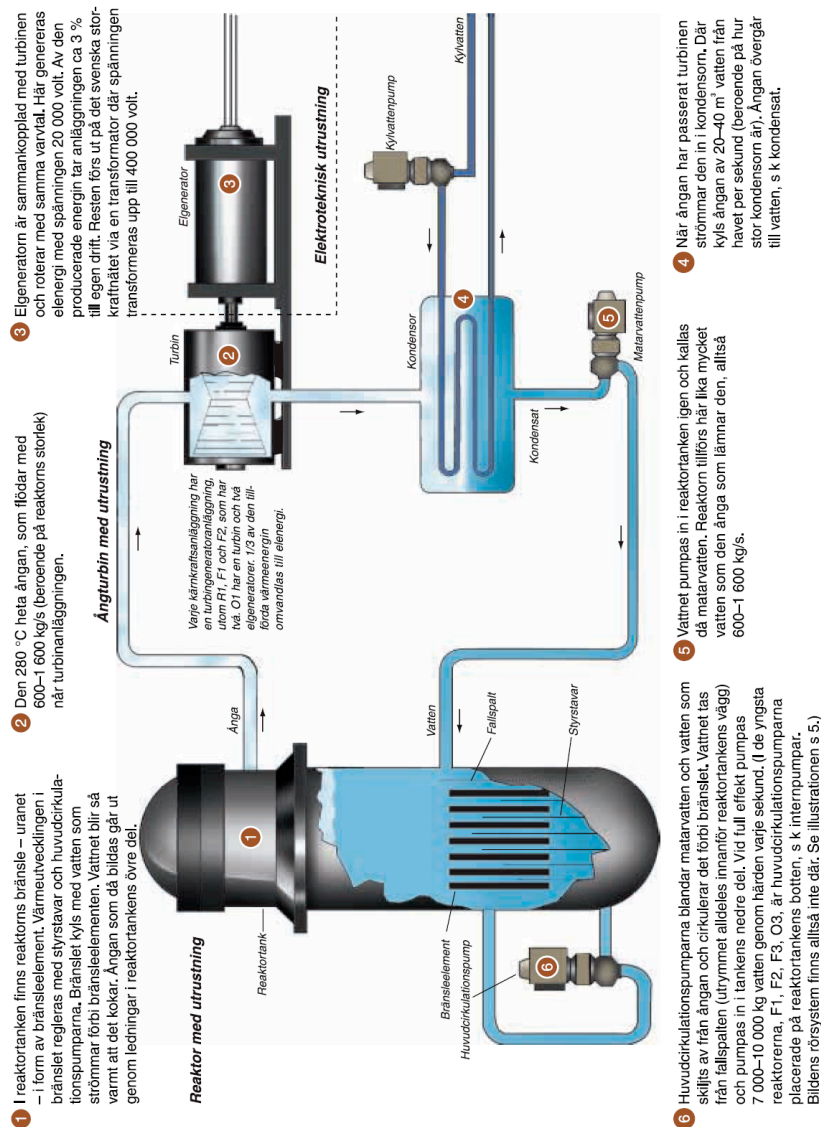
R	Reservdelstrategi	Dimension	Ok/Köp/Säl?	Ok	Ok	Ok	Köp
Kl(res)	Konsekvenskostnad per haven med reserv	kSEK		61 370	13 001	75 924	9 410
Kl(ej res)	Konsekvenskostnad per haven utan reserv	kSEK		287 702	78 528	141 451	108 609
MTBF	Stip. Mean Time Between Failure per komponent	Ar	1	500	500	500	500
MTBF alla	Stip. Mean Time Between Failure alla komponenter	Ar		63	31	125	42
KAr(res)	Risikostnad per år med reserv	kSEK		1 964	694	607	226
KAr(ej res)	Risikostnad per år utan reserv	kSEK		24 296	2 302	1 132	2 607
KAr(diff)	Årlig besparing med reserv	kSEK		22 333	558	524	2 381
KAr(res)	Årlig kostnad för reserv	kSEK	1	176	176	176	407
KA	Årlig vinst med reservkomponent	kSEK		22 156	1 049	348	1 973

Figur D.1 – Excelarket ”Konsekvensmodell”.

Bilaga E Kärnkraftverkets uppbyggnad

I Sverige finns i nuläget tio reaktorer i drift: tre i Forsmark, fyra i Ringhals samt tre i Oskarshamn. Alla dessa är lättvattenreaktorer vilket innebär att vatten fungerar både som moderator och som kylmedel. Det finns två typer av lättvattenreaktorer: kokvattenreaktorer och tryckvattenreaktorer. Tre av reaktorerna i Ringhals är tryckvattenreaktorer medan övriga sju reaktorer är kokvattenreaktorer. Mycket förenklat kan ett kärnkraftverk ses som en jättelik vattenkokare. Ett kärnkraftverk består grovt av reaktor (ånggenerator) och ångledningar, turbinanläggning bestående av högtrycksturbin, fuktavskiljare, mellanöverhettare samt lågtrycksturbiner, generator, kondensat och matarvatten bestående av kondensor, kondensatpumpar, lågtrycksförvärmare, kondensatrening, matarvattenpumpar, högtrycksförvärmare. Vatten förångas i reaktorn genom att bränslet startar en kedjereaktion med hjälp av vattnet som moderator då neutroner krockar och energi frigörs. Ångan leds sedan till ångturbinen där en generator omvandlar ångans rörelseenergi till lägesenergi. Från generatorn skickas växelspänningen vidare till transformatorn som höjer spänningen så att den kan skickas ut på yttre nät. Ångan leds sedan vidare till kondensorn där ångan övergår i vätskeform för att sedan ledas tillbaka till reaktorn. En mer ingående beskrivning av de olika delarna finns i figur A.1 (KSU, utbildningsmaterial).

Hur fungerar en kokvattenreaktor?



Figur E.1 – Kokvattenreaktor (KSU, utbildningsmaterial).

Bilaga F Definitioner

Annuitetsmetoden: Annuitetsmetoden fördelar en investerings kapitalkostnader med lika stora årliga belopp under investeringens hela ekonomiska livslängd. Med kapitalkostnader menas summan av ränta och avskrivningar. Parametrar som har betydelse för den årliga kostnaden av investeringen är räntan, den ekonomiska livslängden samt inköpspriset. (Olsson, 2005)

Anläggningsreserv: En reservdel som delas med annat kraftverk och därför kan vara lokaliserad antingen på det egna eller det andra kraftverket.

Avställning: Minskning av en kärnreaktors reaktivitet så att kärnreaktorn blir klart underkritisk. (SMS, 1990)

CCF: Common-cause failure (CCF) innebär att flera likadana komponenter havererar samtidigt till följd av gemensamma orsaker. CCF påverkas av faktorer såsom diversifiering av komponenter och fysisk separation av redundanta komponenter. (Kumamoto, 1996)

Felintensitet: Felintensiteten $\lambda(t)$ är förväntade antalet fel hos en komponent under tiden t . Felintensiteten kan bli större än ett till skillnad från sannolikheten. Relationen mellan felintensitet och sannolikhet är följande: $P = e^{-\lambda t}$.

Kallavställning: Avställning av reaktorblock varvid kärnreaktors temperatur sänks avsevärt under drifttemperatur. För vattenreaktorer sänks temperaturen till under 100 grader C. (SMS, 1990)

Konfidensintervall: En parameterskattning är en kvalificerad gissning men på intet sätt kan sägas att det sanna värdet av parametern är detsamma som skattningen. För att öka säkerheten hos skattningen kan intervall användas. Ju större intervall desto större är sannolikheten att det sanna värdet verkligen ligger inom det skattade intervallet. Hur säkra vi är på att det verkliga värdet befinner sig inom det skattade området är konfidensen. Om vi till exempel har ett 90% konfidensintervall så kan vi säga med 90% säkerhet att den sanna parametern befinner sig inom detta område. Vi vill ha ett så litet intervall som möjligt men som täcker in den verkliga parametern med så stor sannolikhet som möjligt. (Rychlik & Rydén, 2003)

Lognormalfördelning: En lognormalfördelning liknar en normalfördelning men med den skillnaden att det är logaritmen av ett visst värde som antas vara normalfördelad. En stokastisk variabel X är med andra ord lognormalfördelad om $\ln X$ är normalfördelad. Detta innebär att alla värden är positiva, fördelningen är förskjuten till höger samt att förskjutningen är en funktion av standardavvikelsen. (Kumamoto, 1996)

Nettoeffekt: Ett reaktorblocks på nätet utmatade elektriska effekt som är lika med bruttoeffekten minus blockets egenförbrukning. (SMS, 1990)

Redundanta komponenter: Redundanta komponenter kan falla bort utan att funktionen går förlorad. Ett vanligt exempel inom kärnkraften är ett s.k. två av tre-system där tre komponenter alla levererar 50 % i ett system. Någon av dessa kan haverera utan att systemet minskar i effekt. Redundans försvinner när en av de redundanta komponenterna servas. Om systemet har säkerhetsfunktioner så finns det ofta restriktioner i STF hur lång tid en anläggning får köras utan redundans. Om en komponent havererar när dess redundans servas så kommer den servade komponenten så snabbt som möjligt att tas i drift. Intressant att undersöka hur stor del av tiden

systemet inte är redundant av p.g.a. service. Ytterligare kriterier för när det är intressant att studera:

- $N = \lambda * T$, (där λ är felfrekvens och T är logistiktid plus monterings- och testtid) är stort, d.v.s. den risken att ytterligare en komponent i den redundanta komponentgruppen havererar.
- Risk för CCF (spänningspulser brand mm) diversifiering.
- Dolda fel, exempelvis elektronik.

(Isdal, 2006)

Risk: Risk definieras som produkten av sannolikheten och konsekvensen av ett haveri. Risker kan delas in i miljö-, person-, anseende- samt anläggningsrisker. Målet med riskanalys är att identifiera felmoder, dess sannolikheter och konsekvenserna av dessa (Rychlic & Rydén).

Säkerhetssystem: System avsett att vidmakthålla säkerheten vid onormala händelser i en kärnteknisk anläggning. (SMS, 1990)

Tillgänglighetsfaktor: Kvot av den tid generatoren är infasad på nätet och den totala kalendertiden, allt hänfört till en bestämd tidsperiod. (SMS, 1990)

Triangelfördelning: Denna fördelning är som namnet antyder triangulär med ett lägsta och ett högsta värde som nedre och övre gränser. För att skapa en triangelfördelning skattas förutom dessa gränser även det värde som bedöms som mest sannolikt. Utifrån detta skapas en triangel innehållandes sannolikhetsmassan.

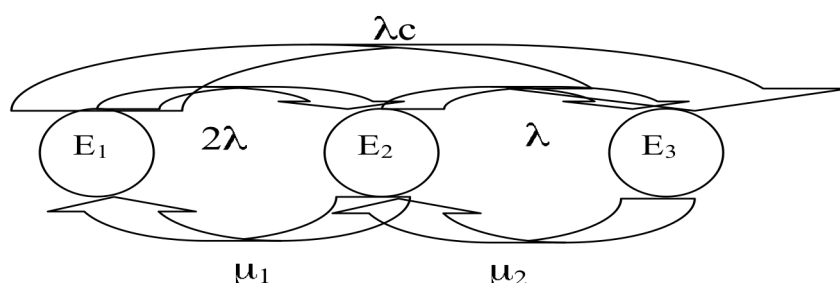
Varmavställning: Avställning av reaktorblock varvid kärnreaktorn bibehåller en temperatur nära drifttemperaturen. (SMS, 1990)

Bilaga G Redundans & Markovkedjor

Redundanser är känsliga då ideala förutsättningar frångås vilket kan visas med hjälp av Markovkedjor. Det är i praktiken svårt att uppnå en förbättring bättre än en faktor 10 för Mean Time Between Failure (MTBF). Figur G.1 visar ett redundant system med CCF, där CCF-faktorn benämns med parametern c . (Isdal, 2006)

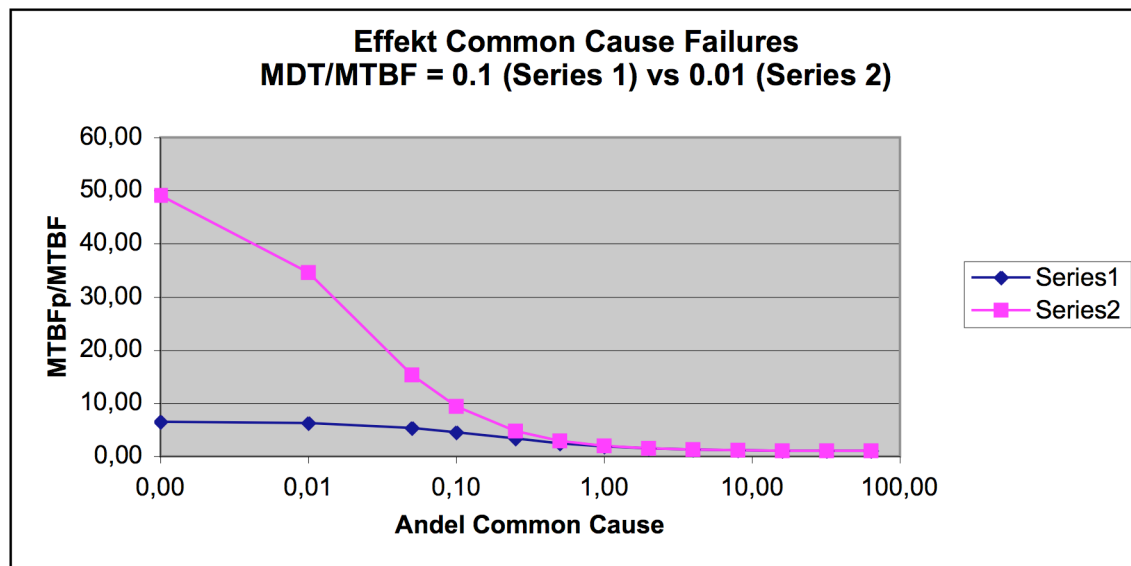
Med ett redundant system menas i detta fall att systemet har två identiska komponenter men att endast en komponent är i drift åt gången för att systemet ska fungera tillfredställande. I det fallet att båda komponenterna fungerar så kommer ändå bara en komponent att vara i drift.

Utiifrån detta resonemang har systemet de tre tillstånden: E_1 =Systemet fungerar: båda enheterna fungerar, E_2 =Systemet fungerar: en komponent fungerar och en komponent är inte tillgänglig (detta tillstånd täcker även in att en komponent är på service) samt E_3 =Systemet fungerar inte: Ingen av komponenterna fungerar. Felintensiteten λ är multiplicerat med två då det i E_1 finns två komponenter som kan haverera oberoende av varandra och övergå i E_2 eller beroende av varandra med felintensiteten λc och övergå i E_3 .



Figur G.1 – Redundant system med CCF.

Figur G.2 visar effekten av CCF på två systemet med olika grader av redundans. $MTBF_s$ är för system med redundans och $MTBF$ är för den enskilda komponenten. X-axeln visar andelen CCF och y-axeln $MTBF_s/MTBF$ anger hur många gånger bättre det redundant systemet är jämfört med det ickeredundanta.

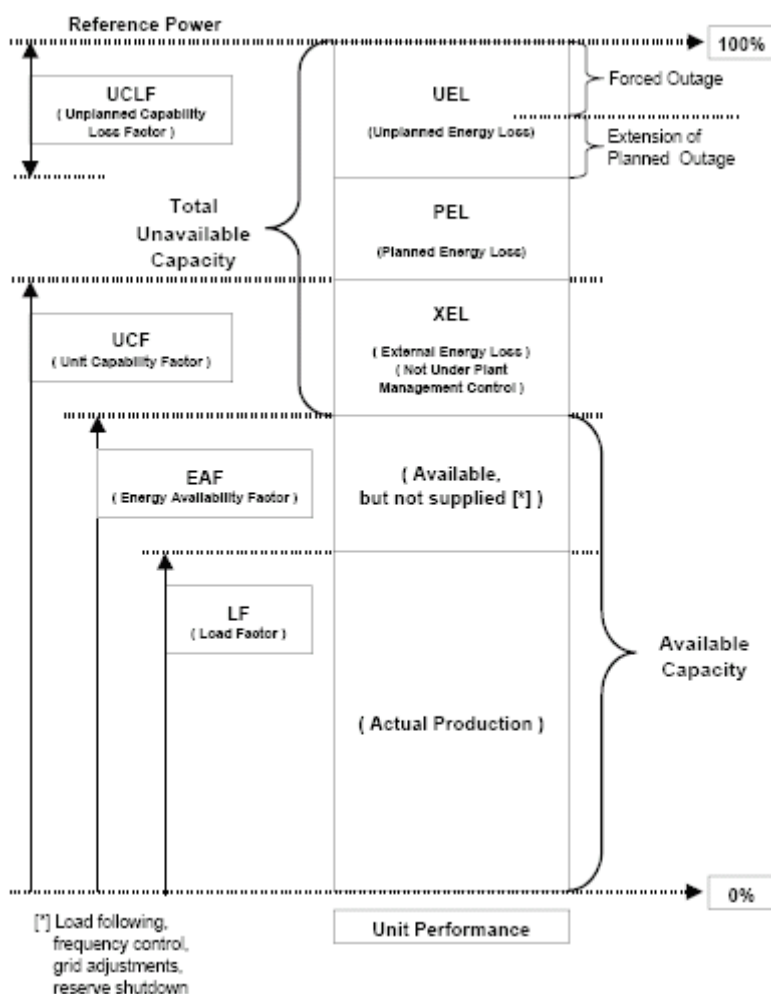


Figur G.2 – Effekt av CCF (Isdal, 2006).

Då redundanseffekten $MDT/MTBF=0.1$ (som i vårt fall) håller sig CCF på en relativt konstant nivå oavsett hur stor andel CCF är. Däremot, då $MDT/MTBF=0.01$, d.v.s. systemet har en bra redundanseffekt som innebär att det är mycket sällan som systemet inte fungerar. Så länge som andelen CCF är liten så är systemet med en välfungerande redundanseffekt mycket bättre men så fort CCF blir omkring en tiondel kommer systemet att haverera lika ofta oavsett redundanseffekt. Eftersom vi inte vet hur stor andel CCF ett system verkligen har måste vi anta att ett redundant system aldrig kan bli mer än en faktor 10 så bra som ett ickeredundant.

Bilaga H Kategorisering av produktion

En central del i beräkningen av den ekonomiska konsekvensen av komponenthaveri är att uppskatta produktionsbortfallet. Bakgrunden till beräkning av produktionsbortfallet är kategoriseringen av produktionen från IAEA:s rapport ”International outage coding system for nuclear power plants”.



Figur H.1 – Kategorisering av produktion (IAEA, 2004).

Figur H.1 visar hur den totala produktionen kan delas in i olika resultatindikatorer. Den totala produktionen kan delas in i de två delarna tillgänglig kapacitet och otillgänglig kapacitet. Den tillgängliga kapaciteten kan sedan delas in i faktisk produktion och utnyttjad kapacitet. Den otillgängliga kapaciteten kan i sin tur delas in i kategorierna extern energiförlust (XEL i figur H.1), planerad energiförlust samt oplanerad energiförlust. Två intressanta indikatorer för att mäta produktionen är load factor (LF i figur H.1) och Energy Availability Factor (EAF i figur H.1). load factor är den faktiska produktionen ut på nät medan EAF eller energitillgänglighet är utrymmet för produktion. (IAEA, 2004)

Bilaga I Reservdelsstrategi och stipulerad risk utifrån stipulerat $MTBF_{ANL}$

Vid ett stipulerat $MTBF_{ANL}$ på 500 år för varje komponent visar tabell I.1 nedan att Forsmark i de flesta fall har en lönsam reservdelsstrategi. För tre av de fyra komponenter som saknar reservdel vore det lönsamt att skaffa en reservdel. 611-Pol finns inte i lager men är inte heller lönsam att ha i lager då logistiktiden från ett annat kärnkraftverk bara är 1-3 dygn. 431-Stator bör Forsmark inte ha i lager då konsekvensreduktionen per investerad krona är mindre än 1. Orsaken till detta är att statorn har en hög inköpskostnad och därmed är kostnaden per år för lagerhållning hög samtidigt som det om den inte finns i lager går att få den från ett annat kraftverk utav en logistiktid på 10-30 dygn. Samma resonemang gäller för 431-Rotor och 431-Matare.

Komponent	Reservdelsstrategi
411-Ångreglerventil	OK
412-Rotor	OK
441-Lager	OK
441-Oljepump	OK
415-Pumprotor	OK
415-Pumpmotor	Köp
431-Härvor (10)	OK
431-Rotor	Sälj ?
431-Vattenföringsdon	OK
431-Stator	Sälj ?
431-Generatorlager	OK
431-Matare	Sälj ?
443-Pumprotor	OK
443-Pumpmotor	OK
611-Pol	OK
611-Anslagspackning	Köp
612-Huvudtransformator	OK
612-Genomförning	OK
718-Pumprotor	OK
718-Pumpmotor	OK
719-Pumprotor	OK
719-Pumpmotor	OK
759-Kompressor	OK
759-Trycktank	Köp

Tabell I.1 – Reservdelsstrategi med stipulerad $MTBF_{ANL}$ på 500 år.

Ett mått på den stipulerade risken för varje komponent kan räknas ut genom att använda stipulerat $MTBF_{ANL}$, som liksom i studien ovan satts till 500 år, tillsammans med den nuvarande konsekvensen. Om de stipulerade riskerna summeras och fås ett mått på den totala stipulerade risken för samtliga studerade komponenter. Att minimera de kritiska komponenternas sammanlagda risk är ett intressant hjälpmedel vid prioritering mellan investeringar. Tabell I.2 visar de olika komponenternas stipulerade risk. Rangordningen skiljer sig åt jämfört med nuvarande konsekvens trots att samtliga komponenter har samma stipulerade risk. Detta beror på att hänsyn tas till hur många komponenter av samma sort som kan haverera.

Komponent	Stipulerad Risk (kSEK)
612-Genomförning	53366
431-Härvor (10)	33867
612-Huvudtransformator	29977
411-Ångreglerventil	19281
431-Stator	12197
443-Rotor	12127
611-Pol	10959
759-Trycktank	8846
415-Pumpmotor	8413
412-Rotor	6817
431-Rotor	6625
412-Oljepump	5963
431-Matare	4248
611-Anslagspackning	4154
441-Lager	4085
443-Motor	3691
431-Generatorlager	3551
415-Pumprotor	2217
719-Pumprotor	2129
718-Pumprotor	1084
759-Kompressor	260
719-Pumpmotor	244
431-Vattenföringsdon	159
718-Pumpmotor	122
Summa	236096

Tabell I.2 – Stipulerad risk.

Bilaga J PSA nivå 1- Risk för härdskador

Genom att granska anläggningens konstruktion och de drifterfarenheter som finns identifieras ett antal möjliga inledande händelser som kan leda till oönskat sluttillstånd. De inledande händelserna grupperas sedan utifrån likhet i händelseförlopp, vilka krav händelserna ställer på enskilda system samt händelsernas inverkan på systemfunktioners användning, prestanda och operatörssituation. Slutligen kvantifieras de olika gruppernas frekvenser utifrån samlad statistik om komponentfel, brand samt rörbrottsdata.

Nästa steg är att i en sekvensanalys beskriva hur haveriförloppet efter den inledande händelsen fortlöper. De säkerhetsfunktioner som krävs för att undvika härdskador eller begränsa konsekvenserna av en inledande händelse identifieras och modelleras i ett händelseträd. Även hjälpsystem som är nödvändiga för säkerhetssystemens funktion identifieras. För att utreda den logiska följden i händelseförloppet konstrueras beroendematriser som visar på beroenden mellan olika säkerhets- och hjälpsystem. Händelseträdets konstruktion så att varje säkerhetsfunktion eller hjälpsystem motsvaras av en funktionshändelse med det dikotoma utfallet lyckad eller misslyckad. De olika vägarna i händelseträdets leder till olika sluttillstånd som anger konsekvens utifrån härdskadans omfattning.

För att beräkna sannolikheten att funktionshändelserna inträffar (misslyckad) eller inte (lyckad) modelleras systemen i felträd där topphändelserna är utebliven funktion hos säkerhetssystemet. Med andra ord konstrueras ett felträd för varje nivå i händelseträdets. Data som används för att konstruera felträden är listor med de olika systemen med undersystem, beroendematriser för funktionskraven från sekvensanalysen, Failure Safety Analysis Report (FSAR), Säkerhetstekniska föreskrifter (STF), flödesscheman, elschema, feldata samt störnings-, test- och underhållsinstruktioner. I felträdet beaktas oberoende komponentfel, beroende komponentfel (CCF), underhållsotillgänglighet, testotillgänglighet, samt otillgänglighet orsakad av operatörsingrepp. Resultatet av systemanalysen är sannolikheter för att topphändelserna ska inträffa. Varje topphändelse insatt i händelseträdets ger sedan sannolikheten för olika konsekvensutfall av den inledande händelsen.

Förutom att redovisa de olika topphändelsernas sannolikhet utförs även en betydelseanalys som visar hur mycket varje händelse bidrar till topphändelsen för varje felträd. Denna analys ger svar på frågorna:

- Hur mycket bidrar komponenten till topphändelsens sannolikhet?
- Hur mycket minskar topphändelsens sannolikhet om komponenten är perfekt?
- Hur mycket försämras systemet om komponenten alltid är otillgänglig?

Vid tolkning av resultaten är det viktigt att ta hänsyn till de osäkerheter som finns i resultaten. Genom en känslighetsanalys kan man utreda om modellen är rätt konstruerad. En känslighetsanalys belyser den statistiska osäkerheten. (Hellström, 2006)

Bilaga K Konsekvensklasserna illustrerade med Markovkedjor

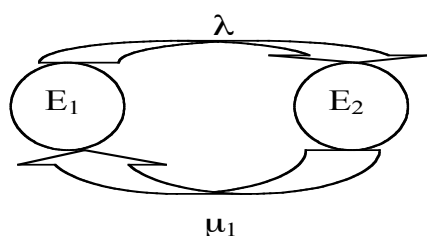
Nedan illustreras skillnaderna hos de fyra olika konsekvensklasserna med hjälp av Markovkedjor. För att skillnaderna tydligare ska framgå är konsekvenserna illustrerade i fallande allvarlighetsgrad då konsekvenserna med högre allvarlighetsgrad ger upphov till enklare Markovkedjor.

Konsekvens 4: Ickeredundant komponent utan reservdel. Denna konsekvens illustreras i figur K.1 och ger upphov till ett dikotomt system med de två tillstånden:

E_1 =Komponenten fungerar och E_2 =Komponenten fungerar ej och måste bytas ut. λ är felintensiteten och μ_1 är utbytesintensiteten. Den havererade komponenten kan bytas mot en ny enligt något av de tre tidigare beskrivna tillvägagångssätten: anskaffa från annan anläggning, forcerat inköp eller normalt inköp. Den förväntade tiden tills ett haveri inträffar och systemet går från E_1 till E_2 ges av $MTBF = \frac{1}{\lambda}$ och den förväntade

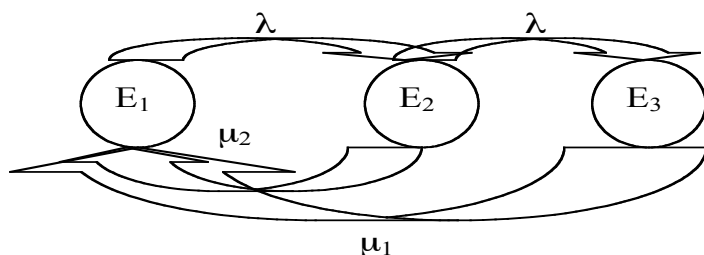
tiden i E_2 ges av $MDT = \frac{1}{\mu_1}$, det vill säga tiden från att komponenten har havererat tills

det att den fungerar igen. MDT kommer att variera beroende på hur en ny komponent införskaffas.



Figur K.1 – Konsekvens 4: Ickeredundant komponent utan reservdel.

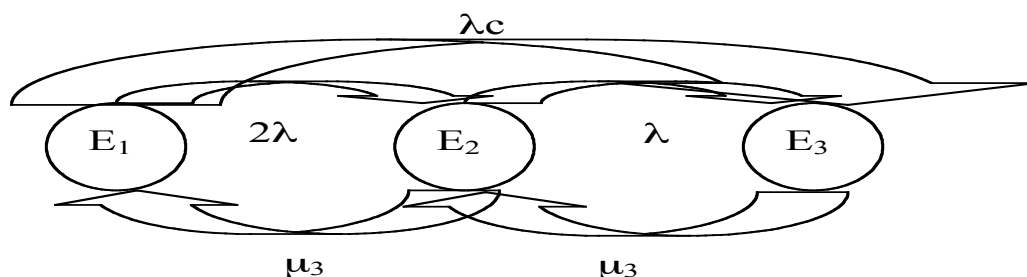
Konsekvens 3: Ickeredundant komponent med reservdel. Systemet har de tre tillstånden E_1 =Komponenten fungerar, E_2 =Komponenten har havererat och väntar på reservdel samt E_3 =Komponenten har havererat och reservdelen är otillgänglig. Tillstånden och övergångarna illustreras i figur K.2. Felintensiteten λ för E_1 att övergå i E_2 är detsamma som ovan och felintensiteten att gå från E_2 till E_3 multipliceras med sannolikheten att reservdelen är otillgänglig, $1-P(\text{reservdel tillgänglig})$, vilken i vårt antagande är satt till 5%. Utbytesintensiteten som ges av μ_2 kommer att vara större än i fallet ovan då reservdel inte finns. Detta medför att den förväntade tiden i E_2 kommer att bli kortare än i fallet ovan. Dock finns sannolikheten att reservdelen är otillgänglig vilket medför att systemet befinner sig i E_3 , där utbytesintensiteten μ_1 blir densamma som i konsekvens 4.



Figur K.2 – Konsekvens 3: Ickeredundant komponent med reservdel.

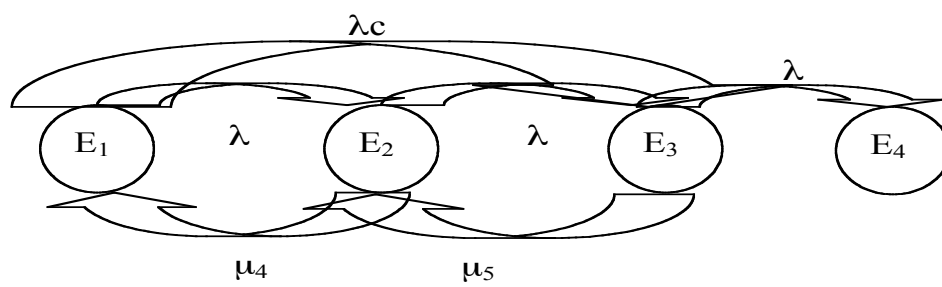
Konsekvens 2: Redundant komponent utan reservdel. I det redundanta fallet är endast en komponent i drift åt gången för att systemet ska fungera även om båda komponenterna fungerar. Denna konsekvens ger upphov till de tre tillstånden: E_1 =Systemet fungerar: båda komponenterna fungerar, E_2 =Systemet fungerar: en komponent fungerar, en komponent är inte tillgänglig, samt E_3 =Systemet fungerar inte: ingen av komponenterna fungerar.

Antingen kan E_1 övergå i E_2 eller så kan E_1 övergå direkt i E_3 genom CCF. Detta illustreras i figur K.3, där c är CCF-faktorn, det vill säga andelen beroende fel. En viss del av tiden kommer inte den redundanta enheten att vara tillgänglig p.g.a. exempelvis service, kontroll och reparation, vilket innebär att systemet befinner sig i E_2 och övergår i E_3 med en viss sannolikhet vid haveri och i E_1 med en viss sannolikhet. I vår modell har vi antagit att den redundanta komponenten kommer att vara tillgänglig i 90% av fallen, detta innebär att sannolikheten att gå direkt från E_1 till E_3 summerat med sannolikheten att gå från E_2 till E_3 är 0.1. μ_3 är utbytesintensiteten för den havererade komponenten vilken kan skilja sig åt på samma sätt som för konsekvens 4, d.v.s. beroende på logistiktid och monteringsid.



Figur K.3 – Konsekvens 2: Redundant komponent utan reservdel.

Konsekvens 1: Redundant komponent med reservdel. Konsekvens 1 illustreras i figur K.4 och har de fyra tillstånden E_1 =Systemet fungerar: båda komponenterna fungerar, E_2 =Systemet fungerar: en komponent fungerar och en komponent är inte tillgänglig (detta tillstånd är detsamma som tillstånd E_1 för konsekvens 3), E_3 =Systemet fungerar inte: Ingen komponent fungerar och systemet väntar på reservdel, samt E_4 =Systemet fungerar inte: ingen komponent fungerar och reservdelen är inte tillgänglig. E_1 kan övergå direkt i E_3 genom CCF, där c som ovan är CCF faktorn.



Figur K.4 – Konsekvens 1: Redundant komponent med reservdel.