



Riskbaserat Underhåll

En förstudie om tillståndsbaserat arbetssätt inom Vattenkraft

Patricia Karlsson och Maria Östlund
Maj, 2015

Handledare: Niklas Lundström (Umeå Universitet)
Susanne Öhrvall (Skellefteå Kraft)



Umeå Universitet
Institutionen Matematik och Matematisk Statistik
Civilingenjörsprogrammet Industriell Ekonomi, Risk Management
Vårterminen 2015
Examensarbete, 30 hp

“... when you have eliminated all which is impossible, then
whatever remains, however improbable, must be the
truth.”

Sherlock Holmes

Förord

Detta examensarbete har utförts under vårterminen 2015 i uppdrag av elbolaget Skellefteå Kraft AB och är det avslutande momentet för Masterexamen vid Civilingenjörsprogrammet Industriell Ekonomi med inriktning Risk Management. Examensarbetet är ett tvärvetenskapligt arbete där en kombination av teknik, management och ekonomi ingår.

Vi som författare vill tacka alla på Skellefteå Kraft som varit delaktiga i detta examensarbete genom att dela med sig av sina kunskaper och erfarenheter. Studiebesöken vid Finnfors Kraftstation har varit oerhört givande och vi är tacksamma för ert fina bemötande. Vi vill speciellt tacka vår handledare Susanne Öhrvall som har stöttat och hjälpt oss under arbetets gång. Vi är tacksamma för att vi fått denna möjlighet att genomföra vårt examensarbete på Skellefteå Kraft och för allt ni lärt oss under denna termin.

Slutligen vill vi rikta ett stort tack vår handledare vid Umeå Universitet, Niklas Lundström, för hans engagemang och värdefulla vägledning genom arbetet.

Skellefteå, 28 Maj

Patricia Karlsson och Maria Östlund

Sammanfattning

Hög tillgänglighet är ett essentiellt krav för vattenkraftsanläggningar för att kunna producera el till befolkningen och industrier utifrån det stundande behovet. Alla tekniska system utsätts för slitage och om inte åtgärder sätts in i tid kan det resultera i kostsamma fel eller till och med haveri med utebliven produktion som konsekvens. Underhåll och inspektioner av de tekniska systemens tillstånd utförs för att upptäcka försämring i tid och för att förebygga fel och skador. Underhåll kan dock vara kostsamt, och med dagens låga nivå på elpriser ställs kraftbolagen inför utmaningen att effektivisera underhållet och samtidigt bevara en hög tillgänglighet. Målsättningen med detta examensarbete har varit att undersöka möjligheten att ta fram en riskbaserad underhållsplan för turbinen i ett av aggregaten i Finnfors kraftstation.

En metod som är funnen som lämplig för ändamålet är en implementering av tillståndsbaserat underhåll. SINTEF Energi Norge AS har tagit fram ett verktyg som estimerar livslängder av komponenter och jämför olika åtgärdsalternativ med nuvärdesberäkning. Examensarbetet har mynnat ut i en förstudie av en implementation av detta verktyg och därmed ett riskbaserat förhållningssätt vid beslutningsfattning om framtida underhållsåtgärder.

Abstract

High reliability is essential for hydropower plants in order to produce electricity to the people and the industry whenever needed. All technical systems are exposed to deterioration, which can lead to failure or even disaster in the form of production losses if maintenance has not been accomplished. The motives of maintenance and inspections of the technical systems condition are to discover deterioration in time and prevent failure and damage. Though, maintenance can be costly and due to the low energy prices power producing companies need to optimize maintenance in order to lower the costs and in the same time retain the demanded high reliability. The aim of this Master Thesis has been to investigate the option to develop a risk-based maintenance plan for a turbine at Finnfors power plant. We have concluded that condition based maintenance is a method that is adequate for the purpose. SINTEF Energy Norway AS has created a tool that estimates life-curves of individual components and compares different maintenance strategies by net present value evaluation. The outcome of this work is a pilot study of an implementation of this tool and thereby risk-based approach within decision-making processes of maintenance planning.

Innehåll

Definitioner och förkortningar	1
1 Inledning	3
1.1 Bakgrund – <i>Vattenkraft</i>	3
1.2 Bakgrund – <i>Skellefteå Kraft</i>	5
1.3 Bakgrund – <i>Produktionsoptimering Skellefteälven</i>	5
1.4 Bakgrund – <i>Kaplanturbiner</i>	6
1.5 Bakgrund – <i>Finnfors Kraftstation</i>	10
1.6 Nulägesanalys	11
1.7 Problembeskrivning.....	12
1.8 Syfte.....	12
1.9 Mål.....	12
1.9.1 Produktmål.....	12
1.9.2 Effektmål.....	12
1.10 Avgränsning	12
1.11 Metodbeskrivning.....	13
1.12 Disposition.....	13
1.13 Analys av nytta	13
2 Teori, empiri	15
2.1 Underhåll	15
2.2 Tillståndsbaserat Underhåll	16
2.3 RCM – Reliability Centred Maintenance	19
2.3.1 Reliability theory (Tillförlitlighetsteori) – The ”R” in RCM.....	21
2.3.2 Systemtillförlitlighet	21
2.3.3 Badkarskurvan	22
2.4 FRAM-modellen.....	23
2.4.1 Sviktmodellen	25
2.4.2 Tekniskt tillstånd och levnadskurvor	26
2.4.3 Tillståndsutveckling.....	29
2.4.4 Vanliga skadetyper och felorsaker på Kaplanturbiner.....	30
2.4.5 Sannolikheter för svikt och konsekvenser av dessa	32
2.4.6 Gammafördelning och expertgruppers utlåtanden.....	33

2.5	Bayesiansk modellering.....	36
2.6	Exempel nuvärdesberäkning.....	37
3	Metod.....	39
3.1	Kartläggning av dagens underhåll på Finnfors Kraftstation.....	40
3.2	Antagande angående underhållsåtgärder.....	41
3.3	Antagande angående svikt/haveri.....	42
3.4	Driftkritiska komponenter.....	42
3.5	Aktuella skadetyper för G2.....	43
3.6	Uppskattning av levnadskurvor.....	43
3.7	Case-beskrivning.....	44
3.7.1	Alternativ 1 - referensalternativ.....	44
3.7.2	Alternativ 2 – renovering av löphjul 2018.....	45
3.7.3	Alternativ 3 – reinvestering löphjul 2018.....	45
3.7.4	Alternativ 4 – renovering löphjul 2018 och reinvestering löphjul 2036.....	45
3.7.5	Alternativ 5 – renovering löphjul 2018 och 2036.....	45
3.8	Lönsamhetsberäkningar av de olika casen.....	46
3.9	Känslighetsanalys.....	48
4	Resultat.....	49
4.1	Körning av NPV-programmet.....	50
4.2	Exempel på de beräkningar som utförts (steg-för-steg).....	54
5	Diskussion och slutsats.....	65
6	Förslag på fortsättning/uppföljning.....	69
7	Referenser.....	72
7.1	Litteratur.....	72
7.2	Akademiska avhandlingar.....	72
7.3	Rapporter.....	72
7.4	Internetkällor.....	73
7.5	Figurer och bilder.....	74
7.6	Intervju.....	74
8	Bilagor.....	1
8.1	Bilaga 1.....	1
8.2	Bilaga 2.....	2
8.3	Bilaga 3.....	6
8.4	Bilaga 4. Alternativ 2 till 5 med låg SVIKT-kostnad.....	7
8.4.1	Åtgärd: renovera löphjul 2018 med MRL = 20 och 10-percentil = 15. Alternativ 2.....	7

8.4.2	Åtgärd: reinvestera löphjul 2018 med MRL=40 och 10-percentil=25. Alternativ 3:1.	10
8.4.3	Åtgärd: reinvestera löphjul 2018 med MRL = 40 och 10-percentil = 30. Alternativ 3:2.	13
8.4.4	Åtgärd: reinvestering av löphjul 2018 med MRL=40 och 10-percentil=34,90. Alternativ 3:3.	16
8.4.5	Åtgärd: Renovera löphjul 2018 med MRL=20 och 10-percentil=15 och reinvestering av nytt löphjul 2036 med MRL=40 och 10-percentil=34,90. Alternativ 4.	19
8.4.6	Åtgärd: Renovera löphjul 2018 och 2036 med MRL=20 och 10-percentil=15. Alternativ 5.	22
8.5	Bilaga 5. Alternativ 2 till 5 med ”Worst-case” SVIKT-kostnad.....	25
8.5.1	Åtgärd: renovera löphjul 2018 med MRL=20 och 10-percentil=15. Alternativ 2.....	25
8.5.2	Åtgärd: reinvestering av löphjul 2018 med MRL=40 och 10-percentil=25. Alternativ 3:1.	28
8.5.3	Åtgärd: reinvestera löphjul 2018 med MRL=40 och 10-percentilen=30. Alternativ 3:2.	31
8.5.4	Åtgärd: reinvestera löphjul med MRL=40 och 10-percentil=34,90. Alternativ 3:3.	34
8.5.5	Åtgärd: Renovera löphjul 2018 med MRL=20 och 10-percentil=15 och reinvestera 2036 med MRL=40 och 10-percentil=34,90. Alternativ 4.....	37
8.5.6	Åtgärd: Renovera löphjul 2018 och 2036 med MRL=20 och 10-percentil=15. Alternativ 5.	40
8.6	Bilaga 6. Levnadskurvor.....	44
8.6.1	Levnadskurvor innan åtgärd med MRL = 5 och 10-percentil = 1.	44
8.6.2	Levnadskurvor efter renovering med MRL=20 och 10-percentil=15.....	45
8.6.3	Levnadskurvor efter reinvestering med MRL=40, och 10-percentil 25	47
8.6.4	Levnadskurvor efter reinvestering med MRL = 40 och 10-percentil = 34,9 ...	48
8.6.5	Levnadskurvor efter reinvestering med MRL = 40 och 10-percentil = 30	50
8.7	Bilaga 7. Expertgruppens uppskattningar av MRL och 10-percentiler.	52
8.7.1	Uppskattningar innan åtgärder.	52
8.7.2	Uppskattningar efter åtgärder, expert 1.....	53
8.7.3	Uppskattningar efter åtgärder, expert 2 och 3.....	54
8.7.4	Uppskattningar efter åtgärder, expert 4.....	55

Definitioner och förkortningar

Aggregat – en enskild uppsättning av turbin och generator med tillhörande utrustning.

CBM - Condition Based Maintenance (Tillståndsbaserat underhåll)

Driftsäkerhet - “Förmågan hos en enhet att kunna utföra krävd funktion under angivna betingelser vid ett givet tillfälle eller under ett angivet tidsintervall, förutsatt nödvändiga stödfunktioner finns tillgängliga.” (Not 1: Driftsäkerheten är beroende av de kombinerade egenskaperna funktionssäkerhet, underhållsmässighet och underhållssäkerhet.) (Europastandard 2001, 9)

EFP – Estimating Failure Probability (Estimering av felsannolikhet).

NDT – Non-destructive testing (oförstörande provning) är ett samlingsbegrepp för metoder som utförs för att undersöka, testa och värdera material. Exempel på NDT-metoder är magnetpartikeltester, vibrationstester och ultraljud.

NPV – Net Present Value (Nuvärdesberäkning).

RCM – Reliability Centred Maintenance (Tillförlitlighetscentrerat underhåll)

Tillstånd - Den ”hälsostatus” en komponent har vid inspektion. Kan i vissa fall graderas utifrån en skala.

Turbin – fångar upp rörelseenergin i vattnet som leds in till turbinen via fasta passager. Turbinen driver i sin tur rotern via en axel.

Tillförlitlighet - “En sammanfattande benämning för att beskriva egenskapen driftsäkerhet och de egenskaper som påverkar denna: funktionssäkerhet, underhållsmässighet och underhållssäkerhet.” (Europastandard 2001, 8)

Tillgänglig tid -“Tidsintervall under vilket en enhet är i ett funktionsdugligt tillstånd.” (Europastandard 2001, 18)

Underhåll - “Kombination av alla tekniska, administrativa och ledningens åtgärder under en enhets livstid avsedda att vidmakthålla den i, eller återställa den till, ett sådant tillstånd att den kan utföra krävd funktion.” (Europastandard 2001, 7)

Underhållsplan - “Strukturerad gruppering av uppgifter som inkluderar aktiviteter, förfaringsätt, resurser och tidsomfattning som krävs för att utföra underhåll” (Europastandard 2001, 7)

Uppehållstid – den tidsperiod en komponent uppehåller sig i ett visst tillstånd.

1 Inledning

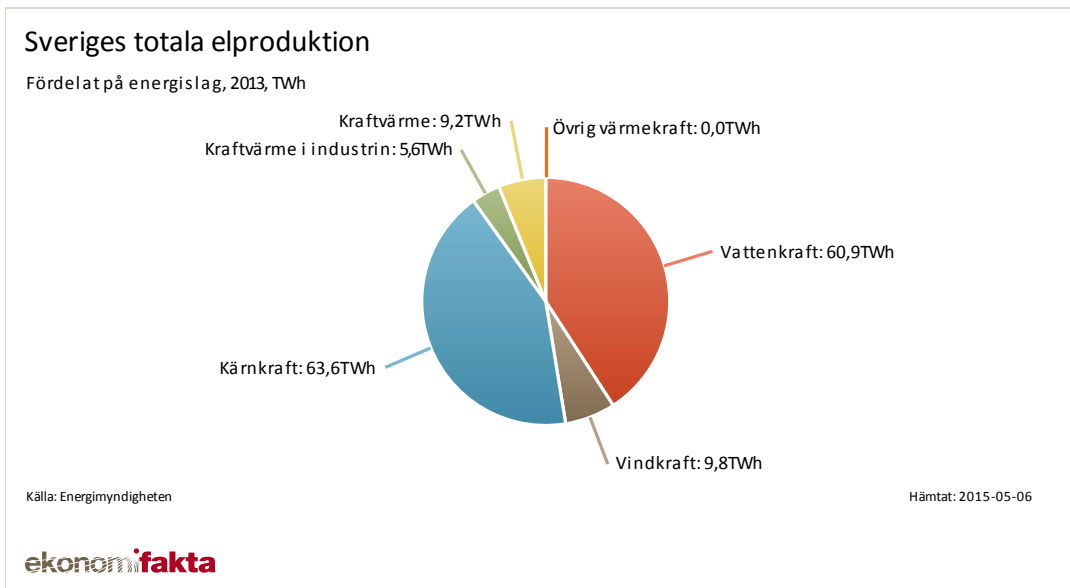
I detta kapitel kommer bakgrunden till problemet, syfte, avgränsningar, metodbeskrivning och mål att beskrivas.

Hög tillgänglighet är ett nödvändigt krav för tekniska system och infrastruktur som till exempel kraftanläggningar, oljeplattformar, luftfartyg, järnvägar och broar. Fel kan leda till höga kostnader, fara för människor och miljön. Alla tekniska system utsätts för försämring och om den blir påtaglig resulterar det ofta i fel/haveri. Fel och haverier hos komponenter och delsystem kan uppstå mer eller mindre frekvent och konsekvenserna av felen kan variera kraftigt. Underhåll och inspektioner av de tekniska systemens tillstånd utförs för att upptäcka försämring och för att förebygga fel och skador. Förbättring och optimering av underhåll kan resultera i kostnadsbesparingar och för att realisera detta behövs en systematisk och strukturerad metod. Det ställningstagande företag ställs inför är om kostnader ska tas för förebyggande underhåll eller som en kostnad för att åtgärda fel då de redan inträffat. Hur pass driftskritisk en specifik komponent eller ett system är kan vara en betydande faktor vid beslutsfattning.

1.1 Bakgrund – Vattenkraft

Vattenkraft har varit och är en mycket viktig del av energiförsörjningen i Sverige. Sedan slutet på 1800-talet har vattenkraften används för elproduktion i stor skala och idag svarar vattenkraften för cirka 45 procent av den svenska elproduktionen. De flesta av Sveriges vattenkraftverk byggdes under 40- och 50-talet i takt med basindustrins utveckling som medförde ökad efterfrågan på stabil elförsörjning. Då som nu är behovet av trygg elförsörjning oerhört viktigt för Sveriges företag och utveckling. (E.ON)

Totala elproduktionen i Sverige ligger kring 145 TWh. Det är kärnkraft och vattenkraft som står för huvuddelen av elproduktionen medan värmekraftverk och vindkraft endast står för en bråkdel av den totala produktionen, se figur 1. Vattenkraften i Sverige kan producera mellan 50 till 70 TWh beroende på vattenmängder. (Svensk energi)



Figur 1. Sveriges totala elproduktion i TWh fördelat på energislag år 2013.

Sveriges största elproducenter är Vattenfall, Fortum, E.ON, Statkraft Sverige och Skellefteå Kraft. Den svenska staten äger 39 procent av elproduktionskapaciteten, 39 % ägs av utländska ägare och cirka 12 procent ägs av kommuner. Resterande procent är fördelade på andra ägare. (Swedish smartgrid)

Vattenkraften är förnyelsebar och ingår i ett naturligt kretslopp, vilket gör den till en viktig framtida energikälla. En av de utmaningar som energibolagen står inför är att bevara en god miljö i områden där vattenkraftverk och dammar byggs. Vattenkraften står även inför andra utmaningar. De rekordlåga elpriserna tillsammans med frekvenskörning på grund av vindkraftens utbyggnad ställer nya tuffa krav. De låga priserna härrör främst från elmarknadens avreglering som trädde i kraft på 90-talet. I och med avregleringen utsattes kraftbolagen för en konkurrenssituation som var ny för dem. Priserna pressades nedåt till fördel för kunderna och kraftbolagen har därför tvingats se över sina kostnader för att vara konkurrenskraftig på elmarknaden. Därmed har kostnaderna för underhåll inom kraftbolagen blivit en alltmer aktuell fråga. En ytterligare aspekt som påverkat elpriset är att vindkraften producerar el då förutsättningarna finns, det vill säga då det blåser. Detta medför att det tidvis finns ett överskott av el. Överskottet påverkar priserna nedåt och idag ligger elpriserna på rekordlåga nivåer. För att förstå elprisets utveckling kan en enkel jämförelse mellan dagens elpris på cirka 60 öre per kWh ställas mot elpriset i början på 1900-talet (Elpriser.se). Skellefteå krafts pris låg i den ringa begynnelsen på 20 öre per kWh vilket i dagens penningvärde motsvarar 8 kronor (Skellefteå Kraft).

Vattenkraften är den elproducent som enklast kan frekvensreglera sin produktion. Med det menas att man med vattenkraft snabbt kan dra ned på, alternativt öka sin

produktion emedan exempelvis vindkraften endast kan producera då det blåser. El kan inte lagras på något enkelt sätt och måste därför produceras och levereras samma sekund som den förbrukas, vatten kan däremot sparas i magasin. Från att traditionellt varit ensam producent på marknaden har nu vindkraften seglat upp som en ny ”konkurrent” vilket ställer nya krav på vattenkraften. Utbyggnad av vindkraft medför att vattenkraften i allt större mån måste styras utifrån vindkraftens förutsättningar och reglera sin produktion. Denna frekvensreglering innebär fler start och stopp för vattenkraftsaggregaten. Detta kommer förmodligen att medföra ett ökat slitage på aggregaten i kraftverken och därmed ett högre krav på underhållet.

Vattenkraftsproducenter står därmed inför utmaningen med förmodat större slitage på aggregaten samtidigt som elprisnivån ligger kvar på en låg nivå. För att hantera detta måste alla kostnader ses över och därmed har kostnaderna för underhåll kommit att hamna i fokus. Genom att effektivisera underhållet utifrån ett riskbaserat förhållningssätt möjliggörs en potentiell kostnadsreducering utan att påverka tillgängligheten av energiförsörjning negativt.

1.2 Bakgrund – Skellefteå Kraft

Skellefteå Kraft grundades 1906 och ett par år efter det stod det första vattenkraftverket i Finnfors klart. Sedan dess har bolaget expanderat. Idag äger, driver och underhåller Skellefteå Kraft 14 större vattenkraftsanläggningar, ett antal mindre vattenkraftsanläggningar och ett flertal egna vindkraftsparker med totalt 61 vindkraftverk i drift. Utöver detta har Skellefteå Kraft tre fjärrvärmeanläggningar samt ägarandelar i kärnkraftverket Forsmark. Elproduktionen ligger årligen kring 3,7 TWh. Aktiebolaget Skellefteå Kraft är helägt av Skellefteå kommun och hade 2014 en omsättning på 3,8 miljarder kronor och 624 anställda. (Skellefteå Kraft)

Skellefteå Kraft levererar el till hela Sverige medan produktionen framförallt är etablerad i norra Sverige där tillgången på kraftfulla älvar och nivåskillnader är god. Av den totala energin som de producerar kommer 75 procent från vattenkraft. Målsättningen med produktionen inom Skellefteå Kraft är att förädla de råvaror de har på bästa sätt. Verksamheten består även av energi- och underhållstjänster. Skellefteå EnergiUnderhåll (SEU) levererar underhållstjänster till företag inom vind, vatten, värme, industri och elnät. SEU ägs numera av Skellefteå Kraft och har mer än 100 medarbetare. (SEU, 2015)

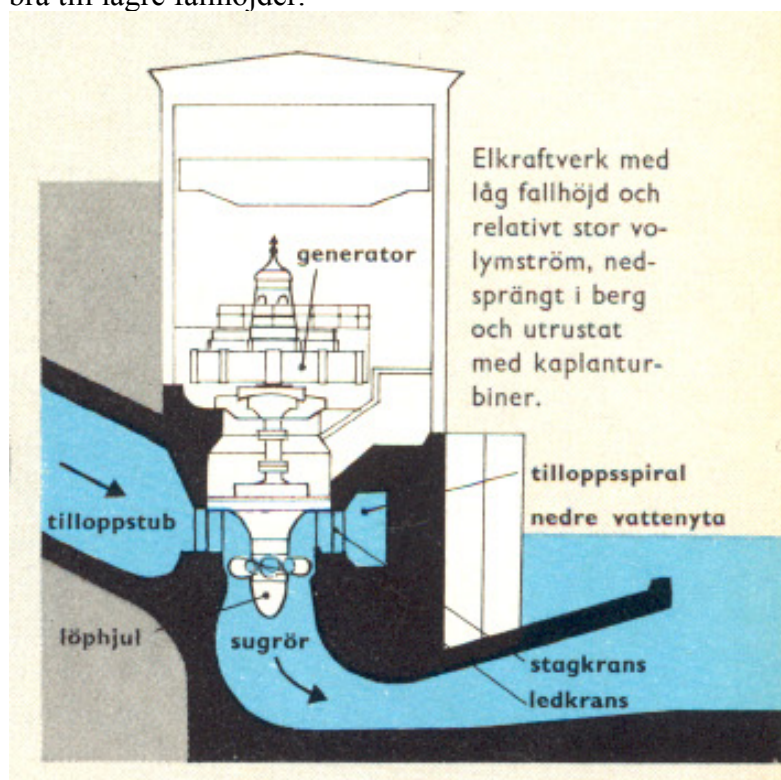
1.3 Bakgrund – Produktionsoptimering Skellefteälven

I Skellefteälven verkar tre olika aktörer och produktionsplaneringen i de olika kraftstationerna samspelar. I och med att älven är så pass utbyggd måste bolagen enas om hur mycket vatten som ska flöda genom stationerna. Aktörerna vill använda sitt magasinsaldo optimalt genom att producera som mest då priserna är

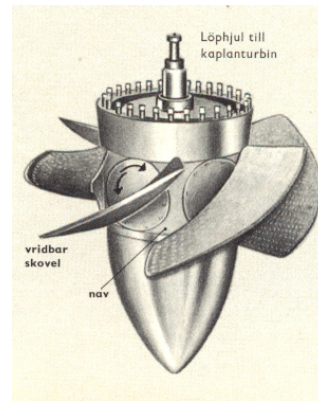
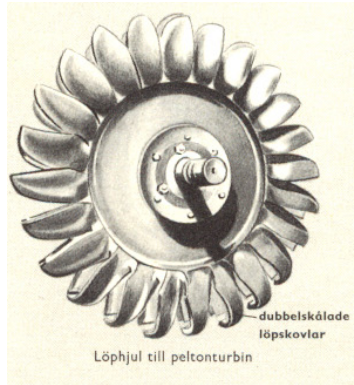
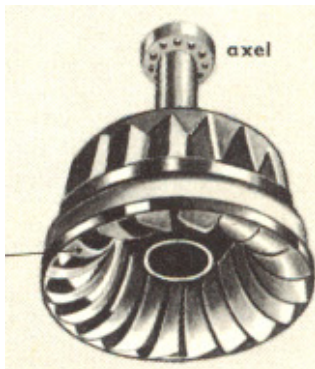
som högst och när tillgängligheten i egna anläggningar är som störst. Planering av produktionen fungerar så att de olika kraftstationerna önskar en viss vattenföring till Skellefteälvens Vattenregleringsföretag som jämkar och bestämmer dagens flöde som då gäller för alla. Detta medför att produktionsbortfall är svårt att räkna på i och med att möjligheten och vilja att använda magasinivatten beror på många olika faktorer. Ibland kan det vara fördelaktigt att spilla vatten i en station om den står stilla istället för att stoppa upp hela älvens produktion och betala för eventuellt produktionsbortfall för andra aktörer.

1.4 Bakgrund – Kaplan-turbiner

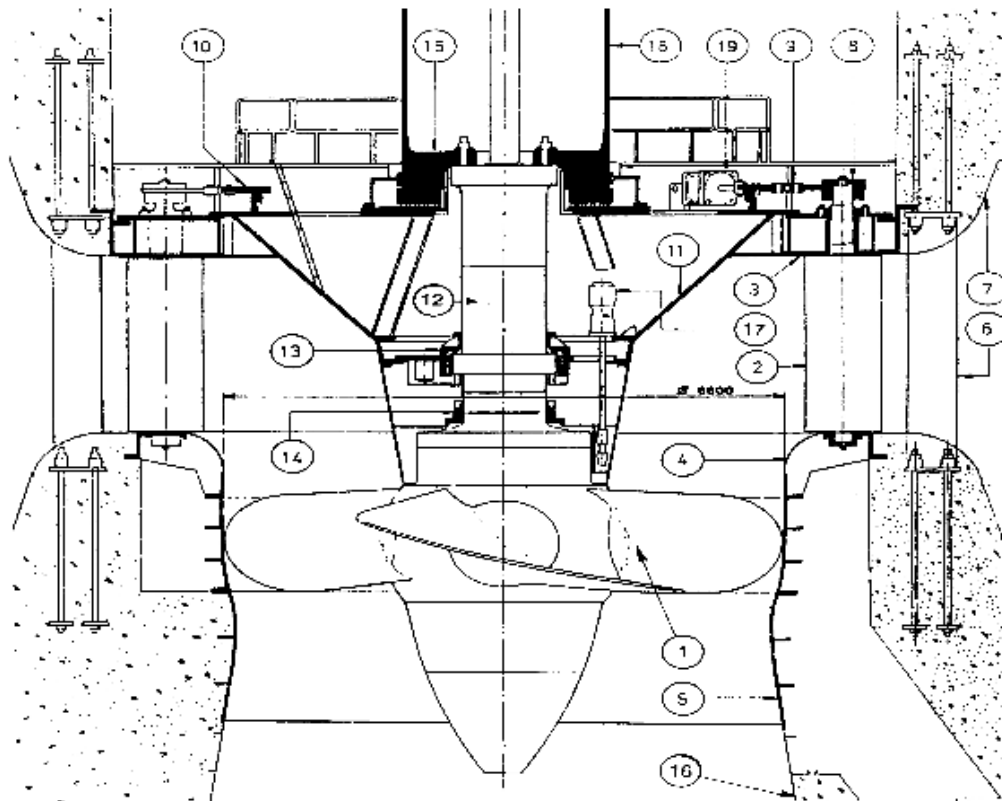
Ett vattenkraftsaggregat består av en turbin, en generator, se figur 2, samt en transformator. I detta examensarbete ligger fokus på turbiner därmed berörs inte generatorer eller transformatorer fortsättningsvis. De vanligaste turbinerna inom vattenkraft är Francis-, Kaplan- och Peltonturbiner, se figur 3. Francisturbinen har ett löphjul med fasta löphjulsskovlar och passar bra där fallhöjden är stor. Peltonturbinen lämpar sig också bra där fallhöjden är stor, 200-2000 meter, och dess skovlar är dubbelskålade. Kaplan-turbinen har vridbara löphjulsskovlar och passar bra till lägre fallhöjder.



Figur 2. Schematisk bild av ett vattenkraftsaggregat (Aguiden)



Figur 3. Löphjul till Francis-, Pelton- och Kaplanturbin (Aguiden)



Figur 4. En schematisk bild av ett Kaplan-löphjul (Håndbøker for tilstandskontroll av vannkraft, 2014)

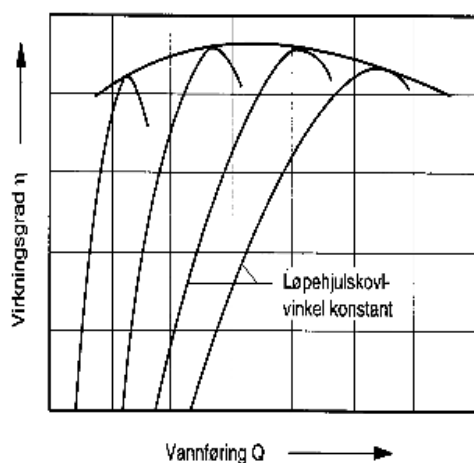
- | | | |
|---------------------|---------------------|--------------------|
| 1. Löphjul | 8. Vev | 15. Bärlager |
| 2. Ledskovel | 9. Brottlänk | 16. Sugrörskona |
| 3. Yttre turbinlock | 10. Reglering | 17. Dräneringspump |
| 4. Nedre stagring | 11. Inre turbinlock | 18. Servomotor |
| 5. Löphjulsammare | 12. Turbinaxel | |
| 6. Stagring | 13. Turbinlager | |
| 7. Spiraltrumma | 14. Packbox | |

Det är en Kaplan turbin som behandlas i examensarbetet. I figur 4 illustreras en Kaplan turbin och dess komponenter vilka är numrerade (1) - (18). Kaplan turbiner har axiellt inlopp till och axiellt utlopp från *löphjulet* (1). Löphjulets skovlar kan justeras genom rotation under drift hos en Kaplan turbin till skillnad från en propellerturbin där skovlarna är fasta. Hos Kaplan turbiner med vridbara *led- och löpskovlar* (1, 2) regleras effekten genom att skovlarna vrids till ett läge som ger nödvändigt massflöde. Kaplan turbiner har hög verkningsgrad och används ofta vid lägre fallhöjder, upp till 75 meter, och är därför vanlig i Sverige.

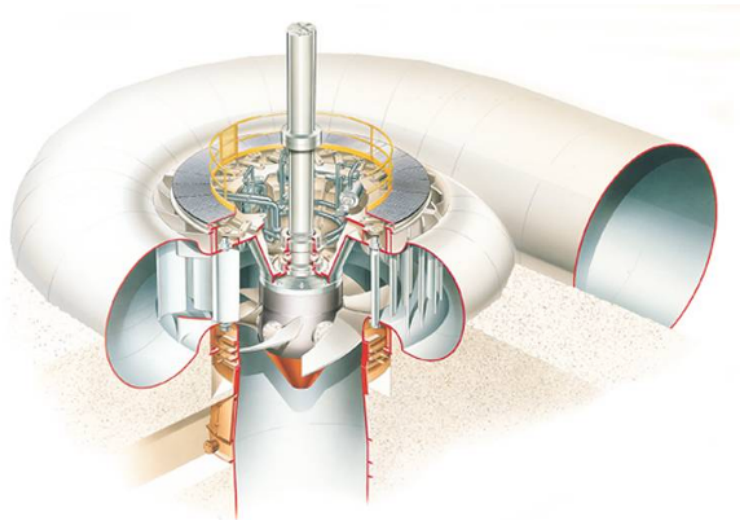
Den österrikiske ingenjören Viktor Kaplan har utvecklat Kaplan turbinen utifrån Francisturbinen. Kaplan turbinen arbetar över ett brett reglerområde, i och med att

löphjulsskovlarna också kan vridas strävar man efter att hitta en gynnsam kombination led- och löpskovelinställningarna.

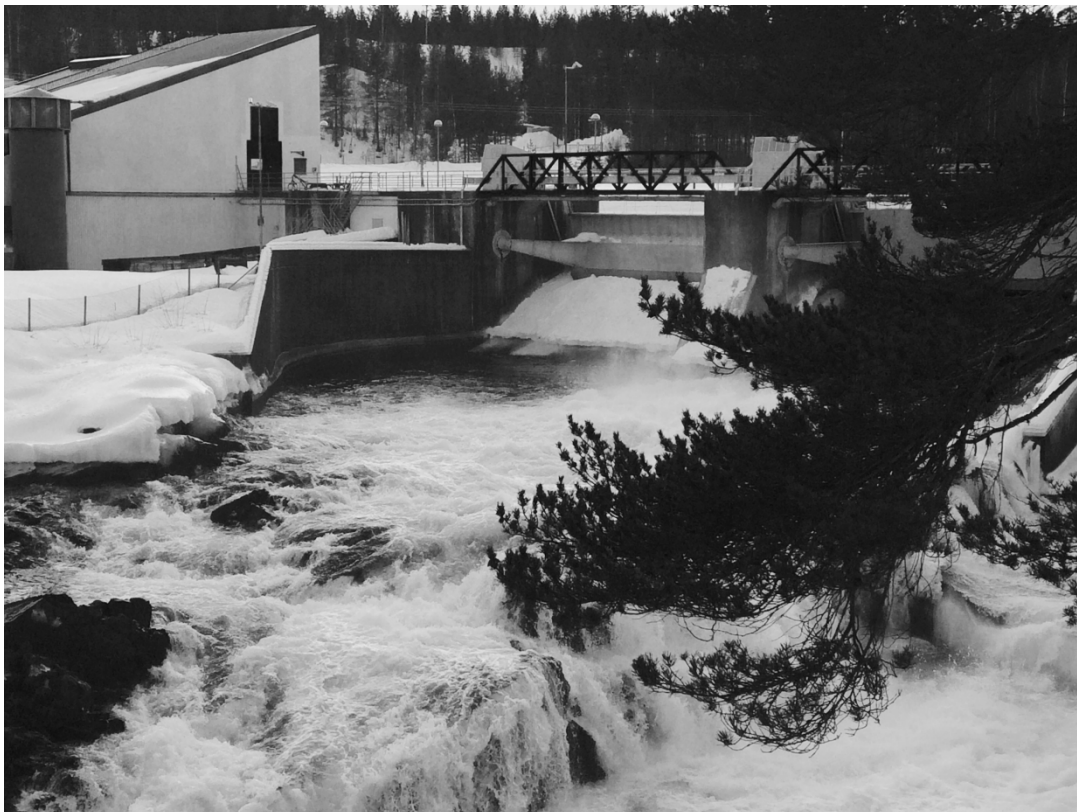
Ett Kaplan-löphjul har på grund av vridbara löphjulskovlar en jämn verkningsgradskurva, se den översta kurvan i figur 5, vilket i figuren jämförs med en propellerturbin med fasta ledskovlar. Löphjul med fast vinkel på skovlarna har en mycket specifik verkningsgradskurva (figur 5). (Håndbøker for tilstandskontroll av vannkraft, 2014)



Figur 5. Verkningsgradskurva (Håndbøker for tilstandskontroll av vannkraft, 2014)



Figur 6. Illustration av en Kaplanturbin med snäcka (vattenväg) (Håndbøker for tilstandskontroll av vannkraft, 2014)



Figur 7. Foto av Finnfors Kraftstation 2015

1.5 Bakgrund – Finnfors Kraftstation

Finnfors Kraftstation ligger i Skellefteälven drygt tre mil uppströms från Skellefteå. Det första aggregatet togs i bruk redan 1908 och utökades med tiden med ytterligare ett aggregat. Sedan ett antal år fungerar det ursprungliga vattenkraftverket som museum. I anslutning till den gamla kraftstationen byggdes en ny kraftstation 1955 bestående av ett aggregat (G1). 1979 utökades kraftstationen med ytterligare ett aggregat (G2). 1994 gjordes större renoveringar på det äldre aggregatet G1 medan G2 lämnades i befintligt skick. Det är turbinen i aggregat G2 som stått i fokus under detta examensarbete.

Finnfors Kraftstation är en ovanjordsanläggning och består av två aggregat. De två aggregaten har var för sig en kapacitet på cirka 21 MW. Den normala årsproduktionen för Finnfors kraftstation ligger kring 232 GWh.

Tabell 1. Fakta om Finnfors Kraftstation

Antal aggregat	2 (G1 och G2)
Turbintyp	Kaplan
Stationstyp	Ovanjordsanläggning
Effekt	42 MW(tillsammans)
Normal årsproduktion	232 GWh
Byggår:	
Gamla anläggningen	1908
G1	1955
G2	1979
Fallhöjd	20,7 m

(Skellefteå Kraft)

1.6 Nulägesanalys

I dagsläget består det förebyggande underhållet på Finnfors Kraftstation av tidsbestämda ronder, inspektioner och översyner av aggregaten. Ronderna utförs varje vecka, inspektioner görs en gång varje år och vart tredje år utförs översyner. Vid en översyn töms aggregatet på vatten så att de komponenter som vanligtvis ligger under vatten kan besiktas och åtgärdas om behov finns. Inspektioner och översyner planeras in under sommartid då vattennivåerna är låga i älven och efterfrågan på el är lägre än under året i övrigt. Underhållet sker periodiskt och är i nuläget inte tillståndsbaserat.

Skellefteå Kraft planerar tillsyn och underhåll av vattenkraftsanläggningarna noggrant för att kunna säkerställa driftsäkerhet. Tidsperioden mellan större renoveringar av utrustning och maskiner beräknas till 40 år och det är av största vikt att säkerheten och tillgängligheten är tillfredställande under denna tid. Oförutsedda stopp kan vara mycket kostsamma.

I och med dagens frekvensstyrning av vattenkraften ställs nya och tuffare krav på flexibilitet av produktionen. Detta förmodas påverka nedbrytningsprocessen hos aggregaten mer än tidigare vilket ställer nya krav på underhållsarbetet.

1.7 Problembeskrivning

Kan man utifrån tillförlitlighet och risker utforma en långsiktig underhållsplan?

- Vilka komponenter är mest driftskritiska?
- Hur beräknar vi sannolikhet/risk för fel/brist/haveri

1.8 Syfte

Syftet med detta examensarbete är att ta fram en kostnadseffektiv underhållsplan utifrån teoretiska studier i riskbaserat underhåll och kartläggning av turbinen i aggregat G2 vid Finnfors kraftstation. Underhållsplanen ska balansera risker mot kostnader och kommer att innehålla förebyggande kontroller samt planlagda underhållsåtgärder. Slutligen ska den framtagna underhållsplanen jämföras med det underhåll som utförs idag.

1.9 Mål

Här följer en beskrivning av arbetets produktmål och effektmål.

1.9.1 Produktmål

Att undersöka möjligheterna för att implementera en kostnadseffektiv underhållsplan som tillämpas på turbinen i aggregat G2 vid Finnfors kraftstation. Målet med underhållsplanen är att tillgängligheten och energiproduktionen hos G2 i Finnfors ska kunna optimeras genom att säkra investeringar och på så sätt få det mest gynnsamma utbytet.

1.9.2 Effektmål

Ett effektmål med den riskbaserade underhållsplanen är att den ska inspirera till en fortsatt utveckling mot ett tillståndsbaserat underhållsarbete inom Skellefteå Kraft. En ytterligare förhoppning är att underhållsarbetet ska integreras med planeringen av produktionen och framtida investeringar. Ett tydligare helhetsperspektiv kommer att gynna framtida tillgänglighet och på så vis bidra till optimal produktion.

1.10 Avgränsning

Underhållsplanen har begränsats till att kostnadseffektivisera underhållet av energiproduktionen vid turbinen i aggregat G2 vid Finnfors kraftstation. Alla komponenter i turbinen kommer inte att analyseras närmare utan den komponent

som anses mest driftskritisk, löphjulet, kommer att ligga till grund för den case analys och känslighetsanalys som examensarbetet mynnat ut i.

Aspekter som miljö och människa kommer inte att beaktas i de ekonomiska beräkningarna utan där är det företags strävan mot tillgänglighet och lönsamhet som ligger i fokus. Men dock bör nämnas att en viktig del i underhållsarbetet är att motverka negativ miljöpåverkan såsom oljeläckage, detta ligger i företags intresse och bör vara en del av beslutsunderlaget. Miljöaspekten tas upp i diskussionen i detta arbete.

Arbetet kommer inte heller att innefatta någon studie om hur andra aktörer inom energibranschen sköter sitt underhåll utan fokus ligger vid att analysera hur Skellefteå Krafts underhåll kan förbättras.

1.11 Metodbeskrivning

Arbetet inleddes med studiebesök på Finnfors kraftstation och med en litteraturstudie inom vattenkraft och underhåll. Efter en rad intervjuer med berörda inom Skellefteå kraft valdes turbinen G2 i Finnfors ut som underlag för fortsatt arbete med underhållsplanen. En kartläggning av driftskritiska komponenter gjordes och en expertgrupp sammankallades för att bedöma parametrar för att utifrån det bestämma komponenternas återstående levnadstid. Dessa uppskattade återstående medellivslängder ligger till grund för de tre riskbaserade underhållsstrategier (case) som analyserats närmare i examensarbetet.

1.12 Disposition

En betydande del av rapporten ägnas åt litteraturstudier inom området tillförlitlighetsbaserat underhåll. Det redogörs för underhållsteorier såsom RCM och CBM tillsammans med specifik teori och forskning inom vattenkraft. Därefter följer en beskrivning av hur examensarbetet genomförts följt av en resultatdel med en Case analys och en diskussion/slutsats om implementeringens lämplighet hos Skellefteå Kraft. Avslutningsvis återfinns rekommendationer till fortsatt arbete.

1.13 Analys av nytta

Resultaten i denna rapport ska inte ses som en absolut sanning då osäkerheten hos flera av parametrarna är stor. Dessutom har många antaganden gjorts vilket ökar på osäkerheten. En betydande del av arbetets osäkerhet ligger i att det inte finns tillräckligt mycket tillförlitligt data att bygga på. På grund av denna brist på data bygger de sannolikhetsfördelningar som använts i arbetet på expertutlåtanden hos erfarna driftstekniker och underhållsingenjörer på Skellefteå Kraft. Att bygga modeller på expertutlåtanden inger osäkerhet på många plan. Dels blir underlaget

begränsat till några få experters uppfattning, dels har de personer som bidragit till det underliggande datat inte haft möjlighet att sätta sig in i arbetet och i arbets sättet i någon större utsträckning.

Detta examensarbete har bidragit till att lyfta fram ny forskning på området underhåll inom vattenkraft för berörda på Skellefteå Kraft. Nyttan av detta är att det kan uppmuntra till ett fortsatt och mer djupgående arbete än vad som varit möjligt att hinna med under denna begränsade tid. En komplett riskbaserad underhållsplan kräver mycket resurser och mycket tid mer än vad som funnits nu. Detta är en arbetsmetod och ett tankesätt som bör integreras i hela företaget för att komma till användning. Därmed kan inte resultatet i rapporten användas som beslutsunderlag i nuläget utan bör ses som ett förslag på hur en modell skulle kunna utformas. Tankegångarna i rapporten kan däremot tas till vara för att bygga vidare på. Nyttan med arbetet ligger i att ett nytt sätt att uppskatta sannolikhet för haveri med hjälp av estimerade levnadskurvor har lyfts fram. Utifrån dessa sannolikheter kan sedan lönsamhetsberäkningar göras som kan ligga till grund för ekonomiska beslut.

2 Teori, empiri

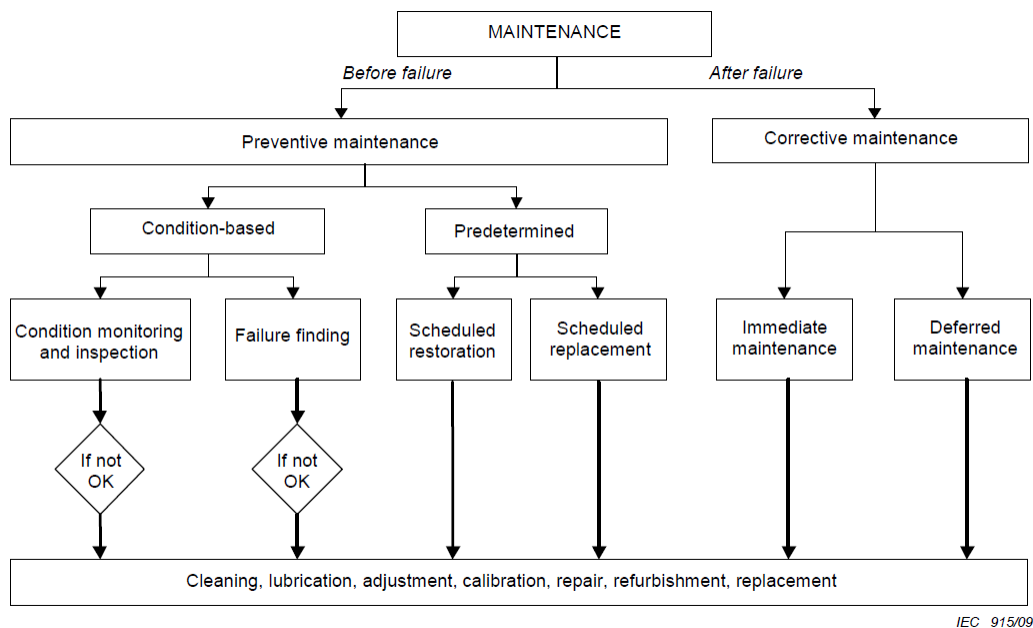
I detta kapitel förklaras begreppet underhåll lite mer ingående. Utöver det redogörs de underhållsteorier som ansetts relevanta för uppgiften.

2.1 Underhåll

Begreppet underhåll kan förklaras utifrån ett flödesschema likt det i figur 8. Traditionellt brukar underhåll delas in i två delar; förbyggande underhåll respektive avhjälpande underhåll. Förebyggande underhåll innebär att underhåll utförs för att angripa en brist innan den utvecklas till en skada, med andra ord åtgärder som utförs för att motverka driftsproblem och haveri. (Svensk standard, 2010, 8-10) Nackdelarna med förebyggande underhåll kan dock vara att icke nödvändigt underhåll utförs och att fullt funktionella komponenter byts ut i onödan. Detta medför att kostnaderna för det förebyggande underhållet kan vara onödigt höga. (Stenholm och Andersson 2014, 11)

Avhjälpande underhåll utförs då ett problem redan har uppstått. Detta kan vara en bra och billig metod då endast få och enklare fel uppstår men om större fel och haveri inträffar kan kostnaderna skena iväg (Stenholm och Andersson 2014, 11). Det förebyggande underhållet kan i sin tur delas upp i förutbestämda åtgärder och tillståndsbaserade åtgärder. (Svensk standard, 2008, 8-10)

Förutbestämda åtgärder är de åtgärder som planeras in. Detta innebär att det förebyggande underhållet schemaläggs med bestämda tidsintervall eller planeras in då komponenter uppnått en viss ålder med syftet att inte äventyra tillgängligheten hos systemet. Då denna form av underhåll tillämpas förväntas likadana komponenter ha samma felfrekvens.



Figur 8. Generell schematisk beskrivning av underhåll (SS-EN 60300-3-11, 2010, 15)

Tillståndsbaserat underhåll är en metod som grundar sig på komponenters/utrustningars aktuella status och bygger på att datainsamling från enskilda komponenter/utrustningar görs. Insamlat data analyseras och komponenten tillstånd bestäms utifrån en skala. Med hjälp av dessa tillstånd kan komponenters/utrustningars förväntade levnadskurvor estimeras och deras status utveckling hållas under uppsikt. Dessa tillstånd ligger sedan till grund för att underhåll och åtgärder kan sättas in i "rätt tid". Tillståndsbaserat underhåll är en metod som endast lämpar sig där det är tekniskt möjligt och ekonomiskt försvarbart att följa en komponent eller ett delsystems tillståndsutveckling.

Avhjälpande underhåll brukar också delas in i två underrubriker; omedelbar åtgärd och uppskjuten åtgärd. Med det menas att de akuta felen åtgärdas omedelbart medan icke akuta fel åtgärdas vid ett senare mer lämpligt tillfälle. (Svensk standard 2008, 16-17)

Vilken åtgärd som krävs och när den bör göras beror på vilket fel som uppstått och hur driftskritiskt problemet är.

2.2 Tillståndsbaserat Underhåll

Tillståndsbaserat underhåll (Condition Based Maintenance, CBM) är en metod som kan sägas ligga någonstans mittemellan åtgärdande- och förebyggande underhåll (Andersson och Stenholm 2014, 11). Tanken bakom tillståndsbaserat underhåll är att underhåll utförs då det behövs men innan haveri uppstått (Andersson och Stenholm 2014, 16). Fördelen med denna metod är att kostnader för

underhållsarbete kan reduceras jämfört med de traditionella metoderna åtgärdande och förebyggande underhåll. Moubray (refererad i Bengtsson 2007, 27) poängterar att tillståndsbaserade övervakningstekniker är effektiva där de är lämpliga men kan å andra sidan medföra besvikelse om lämplighet för tekniken saknas. Moubray konstaterar att tillståndsbaserad övervakning endast är teknisk möjlig för ungefär 20 procent av alla fellägen och endast försvarbara i hälften av dessa fall (Moubray 1997, refererad i Bengtsson 2007, 27). Utförligare beskrivning av denna metod kommer senare i rapporten.

Syftet med underhållsarbete är att förbygga fel och haveri så långt det är möjligt samt ett sätt att identifiera områden där omkonstruktion kan vara befogat. (Coetzee 2004, 53)

Definitionen av fel kan sägas vara ett icke tillfredsställande skick/tillstånd hos en komponent eller ett delsystem, ett negativt avvikande tillstånd från det förväntade. Vad som anses vara ett icke tillfredsställande tillstånd kan variera från organisation till organisation. Fel kan delas upp i två kategorier funktionella fel och potentiella fel. Funktionella fel är då en komponent eller ett delsystem inte fungerar tillfredsställande, enligt definitionen ovan. Potentiella fel är då fysiskt identifierbara tillstånd indikerar att risken för ett funktionellt fel/haveri är överhängande. Definitionen av potentiella fel som en specifik fel-kategori kommer från RCM, vilken beskrivs mer ingående nedan. Kategorin potentiella fel har i sin tur lett fram till konceptet tillståndsbaserat underhåll, CBM, vilket är ett framgångsrikt sätt att förebygga fel/haveri. (Coetzee 2004, 54-55)

Tillståndsbaserat underhåll bygger på att enskilda komponenter eller en specifik utrustnings skick mäts och inspekteras inom bestämda tidsintervall. Genom att övervaka utrustningen på detta sätt kan så tidiga indikationer på fel upptäckas och utvecklingen följas tills dess att förmodat haveri är nära stående och åtgärd är nödvändig. Inspektioner av detta slag grundar sig på människans fem sinnen och utförs av en grupp experter på området. Till viss del är detta en bedömningsfråga men i vissa fall kan även vissa mätmetoder ge en fingervisning på utrustningens skick. Exempel på parametrar som övervakas vid tillståndsövervakning kan vara vibrationer, oljetillstånd, stötpulser, termografi, akustiska förändringar och utrustningsprestation. (Coetzee 2004, 49-51)

För att CBM ska komma till sin rätt bör både prognoser och diagnoser kunna ställas. Prognoserna ska kunna förutsäga fel medan diagnostiserandet bör kunna identifiera rotorsaken till att fel uppkommit. Ett CBM program består av tre steg datainsamling, databearbetning och beslutsfattande. Datainsamling innebär insamling av information från aktuell utrustning/maskin. Databearbetning innebär att informationen från steg ett värderas och omvandlas till parametrar eller ges ett tillståndsvärde utifrån en förutbestämd skala. Slutligen fattas så beslut angående vilket underhållsarbete som ska verkställas och när. (Stenholm och Andersson 2014,

16-19). Enligt Stenholm och Andersson (2014, 20) bör fattade beslut bygga på svaren av följande frågor:

- Diagnos: är komponenten i tillstånd att fela vid aktuell tidpunkt? Om ja, vad orsakade det?
- Prognos: när kommer komponenten att uppnå status fel? Är det dags att schemalägga underhåll?

Det finns flera statistiska metoder och hjälpmedel att använda sig av för att kunna diagnostisera vilket inte tas upp vidare i denna rapport.

När det gäller metoder för att prognostisera kan följande metoder nämnas; kunskapsbaserade, livslängdsmodeller, Artificial Neural Networks och fysikaliska modeller.

- Kunskapsbaserade modeller - Erfarna operatörer och driftstekniker besitter mycket kunskap baserad på erfarenheter av fel och dess orsaker. De kunskapsbaserade modellerna försöker härma de mänskliga experterna.
- Livslängdsmodeller kan delas in i stokastiska och statistiska modeller. Inom industrin har Aggregate Reliability function användts länge. Genom att använda historiska fel-data kan sannolikhetsfunktioner och hazard rate beräknas och modelleras med den bäst passande fördelningen så som exempelvis Exponentiell-, Gaussian- eller Weibull-fördelningar. Eftersom historisk data används för att matcha en god fördelning bör det finnas tillräckligt mycket data tillgängligt för att modellen ska bli lyckad. Bayesianiska modeller, även kallade Conditional probability functions, är en utvidgning av Aggregate reliability functions. Den bygger på tillstånds- och tillförlitlighetsfunktioner för att en händelse ska inträffa och för varje ny händelse uppdateras sannolikheten för framtida händelser genom att använda Bayes teorem. Mer om Bayesianiska modeller återfinns senare i rapporten.

I statistiska modeller, eller datadrivna modeller som de också kan kallas, jämförs det aktuella datat med referensvärden. Ett sätt att göra statistiska prognoser är att titta på trendutveckling. Andra statistiska metoder kan vara autoregressiva modeller som är passande för modellering av tidsserier.

- Artificial Neural Networks och fysikaliska modeller förklaras inte närmare i denna rapport.

(Stenholm och Andersson 2014, 18-23)

2.3 RCM – Reliability Centred Maintenance

Reliability Centred Maintenance (RCM) är en metod som används för att identifiera och välja policy för felhantering för att effektivt och ändamålsenligt uppnå de uppsatta kraven för säkerhet, tillgänglighet och ekonomi för verksamheten. De kan innehålla underhållsaktiviteter, driftsförändringar, designmodifieringar samt andra åtgärder som vidtas för att reducera konsekvenser av fel. RCM introducerades i den kommersiella flygindustrin 1970-talet av Stanley Nowlan och Howard Heap som ingick i United Airlines. Operator/Manufacturer Scheduled Maintenance Development. RCM är numera en beprövad och accepterad metod och används inom många olika industrier. Introducerades i kärnkraftsindustrin i mitten på 1980-talet. (Svensk standard 2010, 6)

RCM tillhandahåller en beslutsprocess för att identifiera tillämpbara och effektiva förebyggande underhållsmål eller ledningsåtgärder för utrustning i överensstämmelse med säkerhet, operationella och ekonomiska konsekvenser av identifierbara fel och vad som orsakat felen. Denna process synliggör om underhållsåtgärder, designförändringar eller andra alternativ är nödvändiga i ett förbättringsarbete. (Svensk standard 2010, 6)

En RCM-analys svarar på 7 frågor som utgår från felmods- och effektanalys samt en riskvärdering av möjliga fel.

1. Vilka är systemets funktioner med tillhörande prestandakrav i dess nuvarande driftssituation?
2. På vilka sätt kan systemet misslyckas med att utföra sina funktioner?
3. Vad orsakar dessa olika fel?
4. Vad händer när dessa fel uppträder?
5. Vilka konsekvenser får felen för systemet?
6. Vad kan göras för att förutsäga eller förhindra felen?
7. Vas ska göras om en lämplig förebyggande underhållsåtgärd inte kan hittas?

(Möller och Steffens 1998, 160)

RCM är en metod som bygger på att identifiera vilka komponenter i en anläggning som behöver förebyggande underhåll istället för att låta den gå tills den havererar och måste repareras i efterhand. En del menar att utrustning/maskinen ska få gå tills de går sönder istället för att förstöra något genom att försöka åtgärda fel. Detta tankesätt fungerar inte om en så hög tillförlitlighet och säkerhet som möjligt eftersträvas för en anläggning. Många anläggningar har testat ett arbetssätt som går ut på "hit-and-miss" eller det gamla vanliga "how-we-used-to-do-it" men de fungerar tills turen de har vänder. (Bloom 2006, 1)

Idag känner de flesta inom produktion, kraftgenerering och andra tekniska omgivningar till terminologin av RCM. Denna grad av igenkännande kan vara

missledande. Konceptuellt är RCM enkelt att förstå men inte alls lika enkel att tillämpa. För att lyckas med att implementera RCM på en anläggning krävs en djup förståelse av processen och att införandet genomförs helhjärtat av alla parter. En ytligt genomförd implementation av RCM gör bevisligen mer skada än vad det tillför. Att synliggöra gömda fel, att förstå när en enskild felanalys inte är gångbar och att veta när “run to failure” kan anammas är grundstenar för att förstå RCM. (Bloom 2006, 3)

RCM har historiskt sett varit problematiskt att implementera. Uppskattningsvis har mer än 60 procent av alla försök att implementera RCM misslyckats. Merparten av de resterande 40 procenten har enbart ytligt implementerats vilket gör den verkliga nyttan av arbetet marginellt. Enligt Neil B. Bloom har RCM blivit alltför komplicerat då det överförts från flygindustrin, med höga krav på tillförlitlighet och säkerhet. Omvänt menar han att det är medvetenheten om komplexiteten som gjort implementeringen framgångsrik i detta fall. (Bloom 2006, 15)

I och med att RCM har sitt ursprung i flygindustrin och dess terminologi har det visat sig att det kan uppstå problem då försök till att implementera den i andra branscher gjorts. Flygbranschens språk och dess processer har i andra branscher missförstås vilket i flera fall lett till att viktiga aspekter har utelämnats under implementering. (Bloom 2006, 17)

Fredrik Backlund tar i sin avhandling *Managing the Introduktion of Reliability-Centred Maintenance, RCM* (2003) upp utmaningar med implementering av RCM inom vattenkraft. Backlund var under en period delaktig i ett försök med att införa RCM i ett av Vattenfalls vattenkraftverk. En slutsats han drar därifrån är att det tar lång tid innan resultat kan mätas. Introduktionen var mycket resurskrävande och pågick under en lång tid vilket kan vara ett problem då framgång är en sporre till att jobba vidare. Dessutom påpekar Backlund att det varit *svårt att se om ansträngningarna med RCM lett till förbättringar eller om* framstegen härrör från andra ansatser som skett samtidigt som implementeringen av RCM. Backlund poängterar trots det att introduktionen av RCM har bidragit till att underhållshanteringen blivit mer effektiv och systematisk tack vare att fokus och arbete lagts på rutiner, tekniska supportsystem, dokumentation och underhållskultur. Backlund menar att det är av största vikt för att nå framgång är att alla delaktiga i organisationen är överlätna, från ledarskap till anställda. Förväntningar och strategier bör vara tydliga för alla inblandade. (Backlund 2003, 213-215)

Vid en introduktion av RCM är god ledning och förvaltning av största vikt. Backlund hänvisar till Moubray, Schawn & Khan som lyfter fram att majoriteten av de problem som uppstår vid implementering av RCM är organisatoriska. (Backlund 2003, 44)

2.3.1 Reliability theory (Tillförlitlighetsteori) – The "R" in RCM

De fundamentala delarna av tillförlitlighetsteorin har stor betydelse för filosofin bakom RCM och dess implementation. Sannolikhetslära och statistik beskriver grundsatserna till tillförlitlighetsteorin och det finns en tanke bakom namnet RCM. Förebyggande underhåll ska centreras kring att bevara utrustningens ursprungliga konstruktionstillförlitlighet. (Smith och Hinchcliffe 2004, 39)

Generellt accepterad definition av tillförlitlighet:

“Tillförlitlighet är sannolikheten att en komponent kommer kunna utföra en specifik funktion under en specifik tidsperiod under givna verksamhetsförhållanden”

Tillförlitlighet hos en komponent/utrustning är en sannolikhetsmässig angelägenhet och detta inför osäkerhet till området. Det finns en sannolikhet att en utrustning/komponent kommer att fungera felfritt men även att den havererar, det går inte att förutse med säkerhet vilken av dem som kommer bli sanning förrän något av alternativen inträffar. Vi står inför sannolikheter varje dag - hur stor är sannolikhet att bilen startar imorgon?

Säkerhet, reglering, garanti, lagar och en konkurrenskraftig marknad som ständigt utvecklas är faktorer som har medfört större fokus på tillämpning av sannolikheter inom tillförlighetsteorin.

En del sannolikhetsproblem kräver kunskap om en hel generation av komponenter eller befolkningar. Genom att studera en hel generation av utrustningar eller en grupp av människor erhålls en *täthetsfunktion*. Många populationers karaktärsdrag eller händelser beskrivs av normalfördelningen. Den teori som är särskilt intressant inom tillförlitlighetsteorin är exponentialfördelningen. (Smith och Hinchcliffe 2004, 43)

2.3.2 Systemtillförlitlighet

Antalet komponenter som ingår i ett system har betydelse för systemets tillförlitlighet. Då komplexiteten hos ett system tilltar sjunker tillförlitligheten hos systemet drastiskt, även om medeltillförlitligheten hos de ingående komponenterna är högre än 90 procent. Alltså måste de enskilda komponenterna i ett komplext system ha hög tillförlitlighet. Detta har även betydelse för mindre komplexa system, om tillförlitligheten minskar något hos de ingående komponenterna minskar tillförlitligheten hos systemet betydligt mer. Tillförlitlighet beror på konstruktionen hos utrustningen/komponenterna. Beroende på hur väl designprocessen är genomförd påverkas tillförlitligheten hos komponenten. Den högsta möjliga

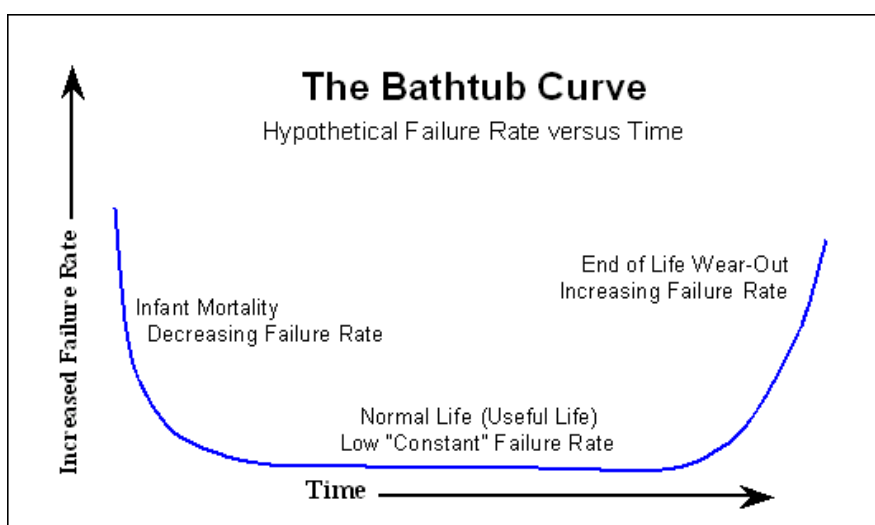
tillförlitlighet som kan nå bestäms av produktdefinitionen där bestämmande av drift och underhåll ingår. Det är under designfasen och utvecklingsfasen som det förebyggande underhållsarbetet specificeras. Detta är av stor vikt för att den inbyggda konstruktionstillförlitligheten ska upprätthållas. (Smith och Hinchcliffe 2004, 40-44)

Inom tillförlitlighet är täthetsfunktionen, $f(t)$, för fel hos komponenter av intresse. Om denna är känd kan tillförlitlighet och otillförlitlighet beräknas samt dödstal och dödlighet. I tillförlitlighetsproblem är felfrekvens, $h(t)$, av intresse för att veta sannolikheten att komponenter i drift kommer att fungera felfritt under kommande tid, T , eller sannolikheten att de kommer att gå sönder (Smith och Hinchcliffe 2004, 47).

Den exponentiella täthetsfunktionen för felfrekvens är den som är speciellt intressant inom tillförlitlighet. Bevisligen följer många komponenter, speciellt elektroniska, den exponentiella täthetsfunktionen och matematiskt är den lättast att hantera. På grund av detta antas först att en komponent, produkt eller ett system följer dess lagar. Felfrekvensen antas vara konstant över tid. (Smith och Hinchcliffe 2004, 47)

2.3.3 Badkarskurvan

Badkarskurvan beskriver underhållskostnaderna under driftfasen från installation av en utrustning/komponent tills den tas ur bruk (figur 9). Enligt denna kurva är kostnaderna höga i början av drifttiden på grund av inkörningsproblem. I slutet av livslängden har utrustningen drabbats av slitage och kostnaderna för underhållet stiger. (Möller och Steffens 2006, 25)



Figur 9. Badkarskurvan (Weibull.com)

I en komponents ringa begynnelse kan risken för fel vara stor. Denna period varar endast under en kort period. Under nästa stadiet i komponentens liv, driftsperioden, antas risken för fel vara konstant. Under en komponents slutfas antas problem med utslitning medföra att sannolikheten för fel ökar. Nedbrytningsprocessens hastighet antas öka i och med att komponenten når successiva strukturella förändringar. (Coetzee 2004, 63-64)

Traditionellt anses badkarskurvan vara applicerbar på alla typer av komponenter och system vilket är olyckligt. Alla komponenter har inte problem med både tidiga fel och problem med utslitning. Vissa system eller komponenter har ingen av dessa problem, andra har ett av dem och en del komponenter har dem båda. Ett annat problem med att anta att alla komponenters utveckling följer badkarskurvan är att alla komponenter inte har en konstant risk för haveri under sin driftstid. En del komponenter har en minskad risk för fel under driftstiden medan andra har en växande risk. Att planera ett underhållsarbete utifrån antagandet att nedbrytningen hos en komponent eller ett system följer badkarskurvan kan leda till bristfälliga strategier. (Coetzee 2004, 64-65)

2.4 FRAM-modellen

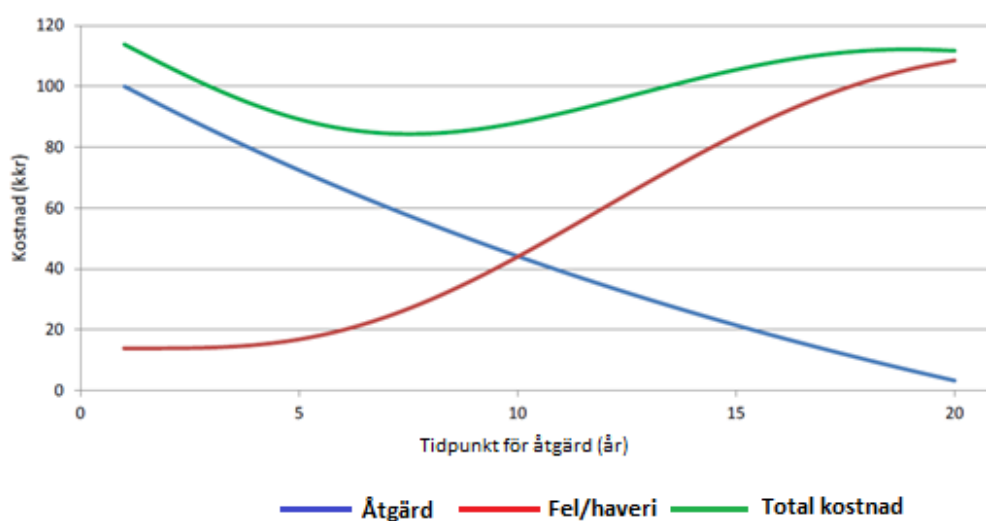
Fremtidens analysemiljø for vedlikeholds- og reinvesteringbeslutninger (Solvang och Istad 2013) är ett projekt som utförts på uppdrag av Energi Norge som resulterat i en teknisk-ekonomisk analysmodell av underhåll och reinvesteringsprojekt (återinvesteringsprojekt) inom vattenkraft. I analysmodellen ingår uppskattning av sannolikhet för fel och tillhörande risk, samt kostnads- och nyttovärdesberäkningar för den aktuella analysperioden och för valda lösningsalternativ. Lösningsalternativen består av renoverings- och reinvesteringsåtgärder. Verktygen har testats i verkliga case av kraftbolag och vilket visar på att de kan användas i praktiken med gott resultat. Det fungerar bra som beslutsunderlag då det sammankopplar risken för tekniskt haveri med den ekonomiska analysen. (Solvang och Istad 2013, 7)



Figur 10. Flödesschema av FRAM-modellen

FRAM-modellens huvudsyfte är att inspirera till utveckling av underhållsarbetet inom vattenkraft. Arbetsstegen för denna analysmodell, se figur 10, utgår ifrån att kartlägga ett analysområde och att fastställa ett dataunderlag. Under fastläggandet av dataunderlag ingår tillståndsbedömningar, framtagandet av levnadskurvor och

sannolikhetsbedömningar för fel och haveri. Nästa steg innebär uppskattning av risk och konsekvenser samt nyttovärdet av eventuella åtgärder. Slutligen sammanställs resultaten för att kunna fungera som beslutsunderlag. I figur 11 nedan illustreras balansen mellan intäkt i form av reducerad sviktsannolikhet och kostnad för åtgärder. Det är önskvärt att hitta en optimal tidpunkt för en planerad åtgärd och kan med denna nuvärdesanalys kan man få en fingervisning om när en åtgärd bör utföras för att få ut ett högt nyttovärde.



Figur 11. Nuvärde av åtgärds-kostnad-, kostnad för fel/haveri- och totalkostnad som en funktion av tiden. (Solvang och Istad 2013, 37)

Data är överlag en brist inom vattenkraften men det vore önskvärt om felstatistik börjar samlas in på ett konsekvent sätt så att en gemensam databas kan byggas upp. FRAM hoppas kunna uppmuntra till detta. En gemensam databas skulle kunna bidra till att robusta statistiska underhållsmodeller kan byggas med vilka underhållsarbetet kan effektiviseras. I bilaga 3 finns ett förslag på hur en sådan databas skulle kunna utformas. (Solvang 2015)

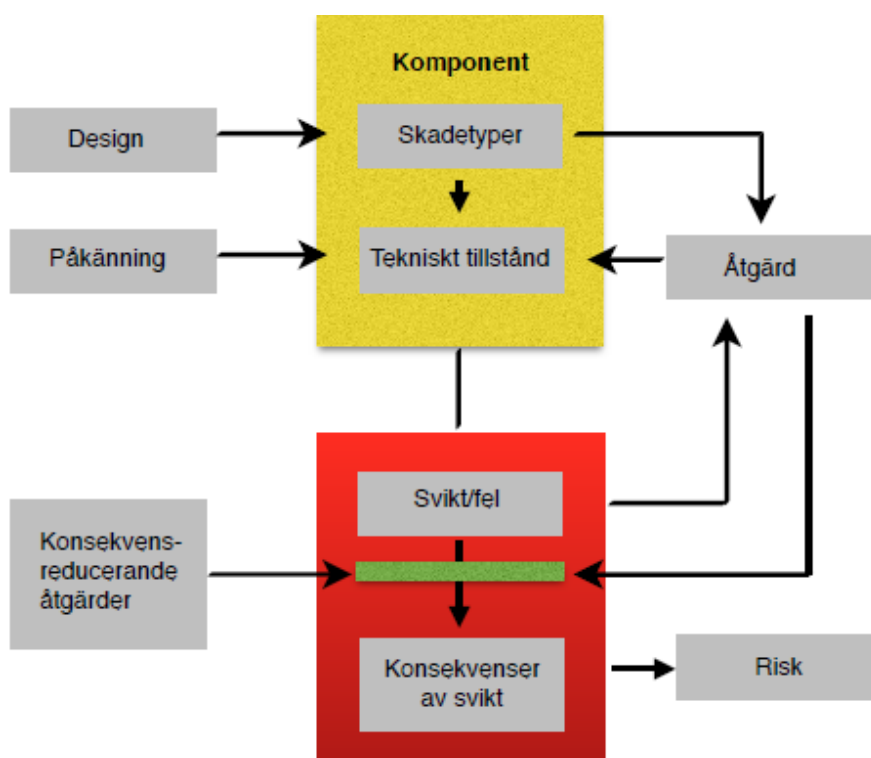
Underhållsbeslut innebär nästan alltid en avvägning mellan risk och nyttovärden rörande ekonomi, personsäkerhet, yttre miljö och omdöme. Analysmodellen FRAM tar endast hänsyn till ekonomi det vill säga intäkter och kostnader för underhåll, reinvestering och produktionsbortfall. Övriga kriterier bör analyseras med andra metoder. Åtgärds-kostnader bör värderas mot den framtida riskreducering som åtgärden bidrar till, som en "intäkt" tillsammans med eventuellt ökad produktionskapacitet på grund av bättre verkningsgrad och effektuppgrädering. (Solvang och Istad 2013, 8)

2.4.1 Sviktmodellen

Det norska ordet “svikt” kan översättas med fel, misslyckande eller underlåtenhet. I denna rapport används ordet svikt för den händelse då en komponent övergår från att kunna utföra krävd funktion till det tillstånd då den inte kan det längre.

Sviktmodellen är en analysmodell som bygger på ett tillståndsbaserat arbetssätt och som till stor del inspirerats av både RCM och CBM. Sviktmodellen ingår som en viktig del i FRAM- modellen under steget fastställa dataunderlag. I detta skede av arbetet inhämtas information om tekniskt tillstånd och felhistorik hos de komponenter som ingår i analysen (Solvang och Istad 2013, 10-11).

Sviktmodellen beskriver hur skadetyper, tekniskt tillstånd, sannolikhet för svikt eller förväntad tid till svikt, konsekvenser av fel och tillhörande risk för komponenter hänger samman. Modellen är ett verktyg för uppskattning av sannolikhet för svikt/fel och vilka risker det kan medföra baserat på observerade tekniska tillstånd. (Solvang och Istad 2013, 19)



Figur 12. Generell sviktmodell (Solvang, Welte och Heggset 2011, 9)

Filosofin bakom sviktmodellen kan enklast beskrivas utifrån en schematisk figur, se figur 12 ovan. En komponent eller ett underhållsobjekt utvärderas enligt sviktmodellen utifrån aktuella skadetyper och det tekniska tillståndet hos komponenten/underhållsobjektet. Det tekniska tillståndet påverkas i sin tur av de för komponentens aktuella skadetyper, materialförändringar (på grund av ålder), inre och yttre påkänningar såsom exempelvis körmönster och överspänningar. Särskilda skadetyper leder till särskilda åtgärder. En komponent eller utrustnings specifika design kan ha stor inverkan på vilka skadetyper som komponenten/utrustningen drabbas av. Åtgärder i sin tur bör ha positiv inverkan på det tekniska tillståndet. I takt med tiden försämras det tekniska tillståndet vilket ökar sannolikheten för svikt/fel. En del fel kan förutses i tid så att eventuella konsekvensreducerande åtgärder kan minimera riskerna men oväntade händelser uppstår ibland utan förvarning. Hur kritisk eller allvarlig konsekvensen av ett fel blir kan variera stort. Konsekvenserna av ett fel kan vara enbart ekonomiska och/eller miljöförstörande. De kan orsaka leveransproblem eller fara för personsäkerheten (Solvang, Welte och Heggset 2011a, 9-10). Konsekvensreducerande åtgärder kan till viss del minska på konsekvenserna och även motverka svikt men här ställs risk och kostnad mot varandra. Det är därför av största intresse att kunna bedöma hur stora riskerna är för att oönskade händelser inträffar så att lämpliga konsekvensreducerade åtgärder kan sättas in i ”rätt tid”.

2.4.2 Tekniskt tillstånd och levnadskurvor

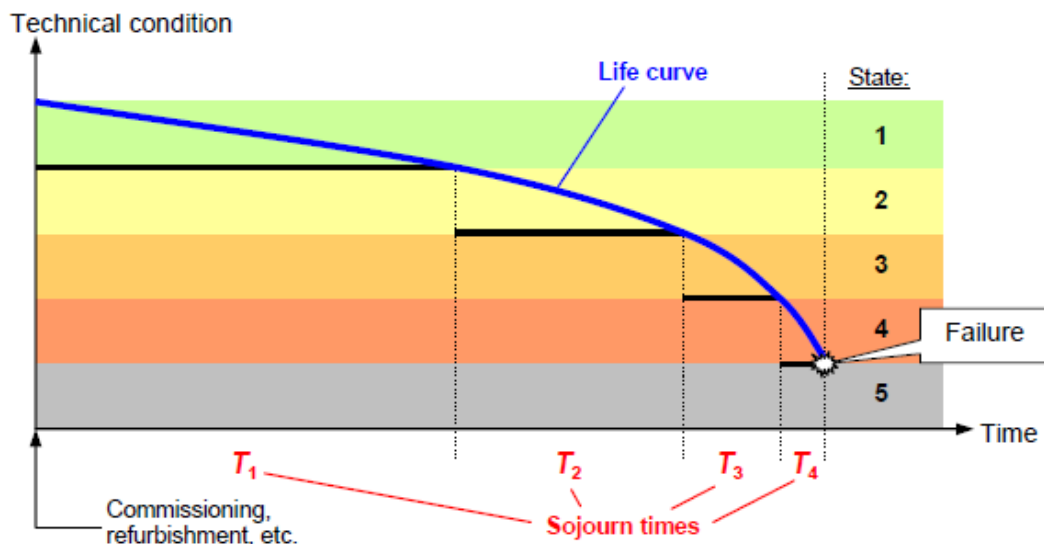
Sviktmodellen bygger på tillståndsvärdering som utgår ifrån Energi Norges *Håndbøker for tilstandskontroll av vannkraft* (2014). Tillståndsvärderingen består av fem kriterier som betygsätter en komponents eller ett systems tekniska tillstånd. De generella tillstånden (1-4) med beskrivande kriterier i tabell 3 är hämtade ur *Håndbøker for tilstandskontroll av vannkraft* (2014) medan det femte kriteriet har lagts till av opphovsmännen till sviktmodellen. Kriterierna i tabell 3 nedan omvandlar och förenklar komponentens kontinuerliga nedbrytning till fyra diskreta tillstånd. När tillstånd (5) uppnås är fel/haveri ett faktum. När en enhet eller en utrustning inte kan utföra det som krävs av den uppstår svikt, tillståndet efter svikt är fel. Svikt är alltså benämningen på övergången mellan tillstånd (4) och (5). (Solvang, Istad 2013, 23-24)

Om en komponent är betydligt sämre än ny (tillstånd (3)) kommer det tids nog bli nödvändigt med någon underhållsåtgärd. När denna åtgärd bör göras beror på hur driftskritisk komponenten är för systemet och vilka eventuella konsekvenser ett fel skulle kunna medföra. När tillstånd (4) nås kan det vara förhållandevis kort tid kvar till svikt och därmed nödvändigt med förebyggande underhåll eller annan åtgärd. (Solvang, Welte och Heggset 2011, 11)

Tabell 2. Generella kriterier för tekniskillståndbestämmande enligt sviktmodellen.

Tillstånd	Kriterier
1	Inga tecken på nedbrytning
2	Något tecken på nedbrytning, d.v.s. något sämre än nytillstånd
3	Utbrett tecken på nedbrytning, d.v.s. betydande sämre än nytillstånd
4	Kritiskt tillstånd
5	Fel

Hur länge kan då en komponent befinna sig i ett speciellt tillstånd? För att kunna bedöma hur fort nedbrytningen hos en komponent går uppskattas en komponents förväntade medellivslängd med hjälp av levnadskurvor. Utvecklingen av komponentens livslängd kan så följas från nytillstånd fram till risken för då svikt blir signifikant, se figur 13. Den uppskattade tid som komponenten befinner sig i varje tillstånd kan bestämmas med hjälp av expertkunskap eller med analyser av data. (Welte, Heggset och Solvang 2011b, 56)



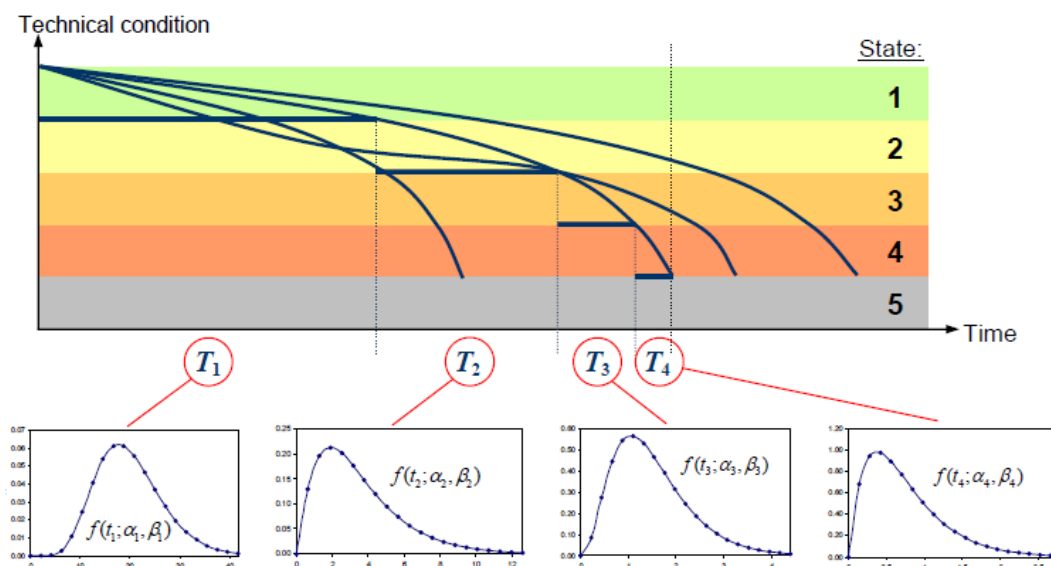
Figur 13. En komponents levnadskurva och uppehållstider i varje tillstånd. (Welte, Heggset och Solvang 2011, 13)

De tekniska tillstånden (state) 1, 2, 3, 4 och 5 symboliserar de fem olika tillstånden av nedbrytning som en komponent genomgår under sin livstid. T_1 , T_2 , T_3 , T_4 och T_5 visar på uppehållstiden i varje tillstånd, det vill säga hur lång tid varje tillstånd varar. Varje given skadetyp och givna påkänningar ger upphov till en specifik levnadskurva. En komponent eller en enhet kan därför ha mer än en levnadskurva. I

figur 14 nedan kan ett exempel på flera sådana kurvor ses men även en medelkurva såsom den i figur 13. (Solvang, Welte och Heggset 2011, 11-12)

En given skadetyper kan så ge upphov till en snabbare nedbrytning och därmed nå svikt betydligt tidigare än vad en annan skadetyper kan. Figur 13 ovan kan antingen representera en given komponents levnadskurva givet en skadetyper eller en medellivslängdskurva givet flera skadetyper hos en komponent.

En komponents uppehållstid i varje tillstånd, T_j , ska inte betraktas som konstanta siffror utan som stokastiska variabler. Betänk en population av lika komponenter med lika driftsförutsättningar. En sådan komponent-population kommer att ha olika långa liv. Detsamma gäller för hur långa uppehållstiderna, T_j , i respektive tillstånd kommer att vara. Dessa uppehållstider, T_j , kan representeras med sannolikhetsfördelningar. I figur 14 nedan visas exempel på hur dessa kan se ut då gammafördelning antagits. Om antagande om oberoende mellan uppehållstiderna görs kan nedbrytningsprocessen beskrivas matematiskt med en semi-Markov process. (Welte 2008, 28)



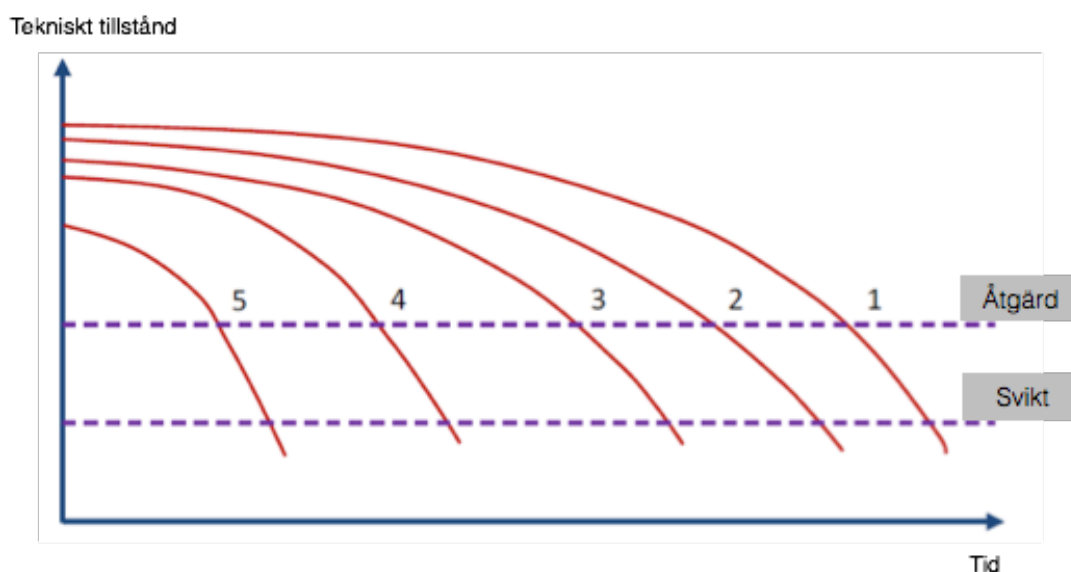
Figur 14. En komponents levnadskurvor givet olika skadetyper (Welte et al. 2011, 13)

När modellering av detta slag görs är vanligtvis en eller flera parametrar okända (Welte et al. 2011, 13). Kunskap om hur konstruktionslösningar, körmoder och skadetyper hos komponenter hänger samman är avgörande för hur bra utformningen av tillståndsutveckling och återstående livstidskurvor blir (Welte, Heggset och Solvang 2011a, 10).

Förebyggande underhåll och reinvesteringar påverkar tillståndsutvecklingen hos en komponent eller ett system. Efter en större renowing/rehabilitering återgår

utrustningen till tillstånd (1), i och med det måste nya levnadskurvor uppskattas. Detta på grund av att kvaliteten hos en komponent/utrustning försvagas med tiden och därmed förkortas även dess medellivslängd. Komponentens/utrustningens återstående livslängd kommer därmed att minska för varje åtgärd och rehabilitering, se figur 14. (Solvang och Istad 2013, 25-26)

Varje kurva i figur 15 representerar levnadskurvan efter en rehabiliterande åtgärd. Kurva 1 visar levnadskurvan efter den första åtgärden, kurva 2 levnadskurvan efter den andra och så vidare.



Figur 15. Exempel på hur levnadskurvor och tillståndsutveckling kan te sig efter förebyggande underhållsåtgärder 1-5 (Solvang och Istad 2013, 26)

2.4.3 Tillståndsutveckling

Livstidsvärdering kan genomföras med hjälp av expertkunskap och/eller analysering av data. Tyvärr är det sällsynt med tillräcklig och bra data inom vattenkraften. Detta p.g.a. att varje enskilt vattenkraftsaggregat kan ses som en unik individ som anpassats till den specifika platsen och för att aggregaten har en sådan lång livstid. Att bygga livstidskurvor på expertutlåtanden kan också vara svårt, eller nästan omöjligt. Trots dessa problem kan och bör försök till tillståndsutveckling och värdering av hur länge en komponent befinner sig i varje tillstånd göras för att underhållsarbetet ska kunna göras mer effektivt. God kunskap om de vanliga skadetyperna och dess utveckling är dock en bra grund för tillståndsbestämning. (Welte, Heggset och Solvang 2011b, 57- 60)

I bilaga 1 finns det förslag på tillståndskriterier och hur tillståndsbestämning kan utföras på ett Kaplanlöphjul. Dessa tabeller är hämtade ut *Svikmodell for vannkraft: Skadetyper og tilstandskriterier av Welte, Heggset och Solvang (2011)*.

2.4.4 Vanliga skadetyper och felorsaker på Kaplanturbiner

De vanligaste skadetyperna på Kaplanturbiner är enligt *Håndbøker for tilstandskontroll av vannkraft (2014)*, normalt slitage, mekaniskt slitage, korrosion, kavitationserosion, sanderosion, rivning, hamring, utmattning, deformationer, förskjutningar/förflyttningar, läckage och lösa förbindelser.

Författarna till svikt redogör för några generella värderingspunkter av de vanligaste skademekanismerna för vattenturbiner. Denna värdering bygger på Hans Aunemo slutsatser. (Welte, Heggset och Solvang 2011b, 57- 60)

De beskrivningar som följer nedan är hämtade från *Håndbøker for tilstandskontroll av vannkraft (2014)*, Hans Aunemos värderingar (Welte, Heggset och Solvang 2011b, 57- 60) och från samlade erfarenheter hos underhållsingenjörer på Skellefteå kraft om inte annan hänvisning finns.

Hamring

Hamring orsakas av främmande objekt i vattenvägarna. (Welte, Heggset och Solvang 2011b, 59)

Kavitationsskador/kavitationserosion

Kavitationsskador/kavitationserosion är en skadetyper som uppstår om det finns problem med undertryck. När det statiska trycket i vattnet sjunker ”kokar vattnet” och övergår i gasform. Dessa gasbubblor imploderar då trycket stiger och skadar då omgivande material. Vattenkraftverk som har en konstruktion som är väl anpassad för platsen bör ha små problem med kavitation. Reglerstyrning kan dock ge upphov till kavitation då inte turbinen får gå i sitt optimala läge under längre perioder. Kavitationsskador kan leda till verkningsgradsreduktion, ökad fara för sprickbildning och upptäcks vid visuell inspektion.

Kavitation utvecklas exponentiellt men har en lång ”inkubationstid” vilket gör att det tar tid innan synliga skador visar sig. Förändringar i lastmönstret kan ha stor påverkan på uppehållstider. (Welte, Heggset och Solvang 2011b, 58)

Korrosion

När det talas om korrosion i samband med vattenkraft menas vanligtvis korrosion på målade ytor i karbonstål. Galvanisk korrosion förekommer men anses inte som ett stort problem. Utveckling av korrosion ökar över tid p.g.a. yttre miljöpåverkan. Tiden mellan de olika tillstånden är beroende på vilka målningsystem som används men även kvalitén på rengöring och yttre miljö. Livstid för moderna målningsjobb ligger oftast mellan 25-30 år. Det går att anta livslängder baserade på erfarenhet

men variationer från fall till fall kan vara betydande. (Welte, Heggset och Solvang 2011b, 57- 60)

Läckage

Skador på packboxen kan leda till att vatten läcker in till turbinlagret. Kan uppstå på grund av mekaniskt slitage, sanderosion eller lösa förbindelser. Vatten i lagerolja är något som måste åtgärdas akut. Smörjeffekten kan försämrats radikalt om vatten läcker in med ökad lagertemperatur och haveri som följd.

Lösa förbindelser

Med lösa förbindelser menas lösa bultar och därmed lösa komponenter men det kan också betyda att lösa stålplattor i sugrör (Welte, Heggset och Solvang 2011b, 60).

Mekaniskt slitage

Typiskt mekaniskt för vattenkraften är slitage i inre lagringar i löphjul och ledkrans, slitage av turbinlager och packbox. Det är normalt att slitaget ökar med tiden och ändrade driftbelastningar kan ha stor inverkan på tidsutveckling. Att bedöma dessa tillstånd är svårt då visuell bedömning inte är möjlig. (Welte, Heggset och Solvang 2011b, 59).

Mekaniskt slitage kan exempelvis uppstå vid vibrationer, dålig smörjning och yttre påkänningar såsom start och stopp. Lagringar kan på grund av obalanser nötas vilket kan leda till att partiklar lossnar. Dessa partiklar följer sedan med oljan och kan i sin tur medföra ytterligare slitage på smorda lagerytor. Lagringar kan även drabbas av varmgång vilket i sin tur kan medföra att oljan drabbas av koxning. Det är ytterst viktigt att ha en ren regler- och hydraulolja.

Skador på lagerytor kan uppstå på grund av mekaniskt slitage, rivning, utmattning, vibrationer, sättningar i fundament och lösa lagerinfästningar. Skador på en lageryta kan ge upphov till ökad lagertemperatur som i sin tur påverkar smörjoljan som kan få försämrade lastkapacitet. En försämrade lastkapacitet kan medföra obalans och att ”knän” på axeln bildas. Ökad obalans medför ökade vibrationer därmed kan andra lagerytor utsättas för onormalt slitage med varmgång som en följd. Lagerhaveri kan uppstå men ökade vibrationer kan även påverka andra komponenter i systemet negativt. Orsakerna till skador på lagerytor kan vara stora mekaniska belastning, vibrationer och produktions- eller monteringsfel.

Slitna inre- och yttrelagringar i löphjul kan medföra att regleringen kan bli glapp och att olja läcker ut. Glapp i regleringen kan medföra att optimala vinklar på löpskovlarna ej går att reglera. Detta i sin tur kan medföra obalanser, vibrationer som kan påverka andra delar negativt. Slitna inre och yttre lagringar medför också att löpskovlarna börjar ”sloka”. Slokande löpskovlar sliter på tätningar och glandring och leder på sikt till oljeläckage. Löpskovlar som börjat sloka kan även ge upphov till rivning på löphjuls-kammarväggen.

Normalt slitage

Orsakas av sanderosion, korrosion, kavitation och slagmärken av främmande objekt som passerar genom turbinen.

Oljeläckage

Läckage av olja kan komma från turbinlager och löphjulsnäv. Oljeläckage från löphjulsnäv härrör oftast från slitna tätningar. Körmonster och typ av tätning påverkar levnadstiderna för tätningarna. Utveckling över tid då det gäller oljeläckage är svårt att bedömmas generellt eftersom utvecklingen kan variera så. (Welte, Heggset och Solvang 2011b, 60).

Konsekvenser som kan uppstå av detta kan vara att löphjulsskovlar inte går att justera, felvisning mellan löphjulsposition och löphjulspåse, ökade oljeläckage i oljesystemet och ökat oljespill.

Rivning

Skador p.g.a. rivning uppstår då komponenter kommer i kontakt med varandra exempelvis om löphjulsskovlar kommer i kontakt med löphjulskammaren. Enligt erfarenhet bedöms moderata rivningsskador inte ge upphov till någon värre utveckling. (Welte, Heggset och Solvang 2011b, 59).

Slitna lagringar som uppstått vid obalans i vertikala krafter kan ge upphov till rivningsskador i förlängningen.

Utmattning

När det kommer till utmattning är det relevant att skilja mellan högfrekvent- och lågfrekvensutmattning. Lågfrekvensutmattning drabbar exempelvis spiraltrumma och reglerring och orsakas av start och stopp av aggregatet. Utveckling av sprickor är exponentiell och tillståndbestämning kräver ofta NDT (Non-destructive testing) av komponenten och detta är svårt att göra p.g.a. ytbehandling. Problem med högfrekvens gäller Francis och Pelton löphjul. (Welte, Heggset och Solvang 2011b, 58).

Sanderosion

Sanderosion varierar över tid beroende av exempelvis säsong, vattenkvalitet vilken typ av sand/silt det handlar om och vattenhastigheten i aggregatet. (Welte, Heggset och Solvang 2011b, 59).

2.4.5 Sannolikheter för svikt och konsekvenser av dessa

Utifrån tillståndsbedömningar och levnadskurvor kan årlig sannolikhet för svikt/fel beräknas (Solvang och Istad 2013, 19). Ett händelsetråd med betingade sannolikheter kan vara ett bra sätt att analysera konsekvenser av svikt. Med den

initierande händelsen som topp och möjliga konsekvenser som sluthändelser kan så en riskvärdering (sannolikhetsbedömning) av olika utfall fås. (Solvang och Istad 2013, 25)

I SVIKT-modellen beräknas sannolikheten för svikt utifrån förväntad återstående livslängd (MRL). (Solvang och Istad 2013, 37)

En känslighetsanalys som visar på möjliga utfallsrum bör bygga på viktiga parametrar såsom:

- Tekniskt tillstånd (på dominerande skadetyper)
- Förväntad återstående livslängd (på dominerande skadetyper)
- Konsekvenser av svikt
 - efterbehandling efter svikt
 - otillgänglighet p.g.a. svikt
- Förväntat kraftpris
 - otillgänglighet p.g.a. svikt (proportionell med förväntat kraftpris)
 - intäkt p.g.a. ökad verkningsgrad
 - intäkt p.g.a. ökad effektinstallation
- Diskonteringsränta

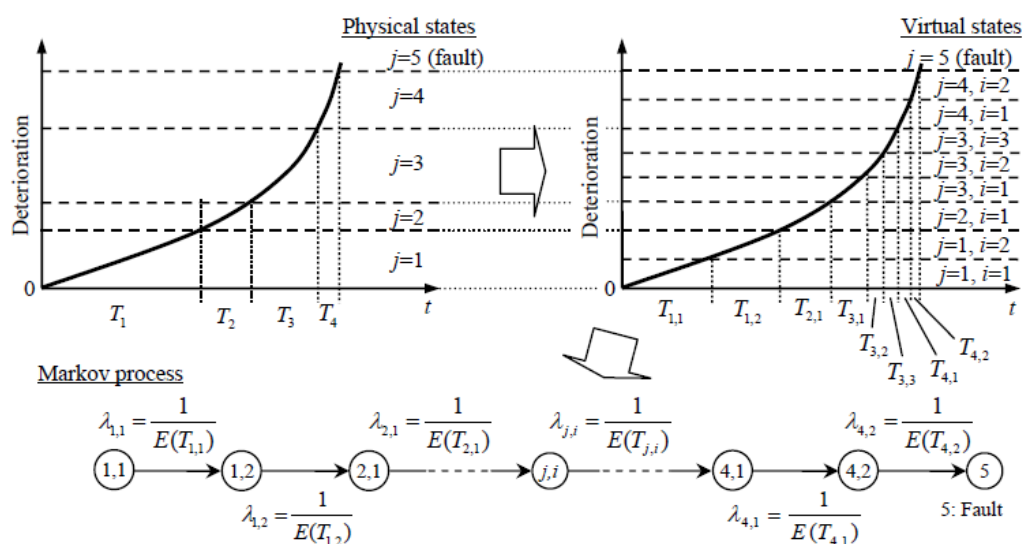
(Solvang och Istad 2013, 44)

2.4.6 Gammafördelning och expertgruppers utlåtanden

I många applikationer är uppehållstider i de fysiska tillstånden modellerade med en exponentialfördelning. Detta för att de exponentiella fördelningarna kan användas som tillståndsstadier direkt i matematiska försämringsmodeller. Enligt Thomas Weltes arbete och forskning, utförd av SINTEF Energy Research, har komponenters uppehållstider i respektive tillstånd som är byggda på samlade expertutlåtanden inte visat sig vara exponentiellt fördelade. Welte menar att exponentiella fördelningar ofta inte representerar verkligheten. Därför föreslår han att en gammafördelning ska användas för att modellera uppehållstider i fysiska stadier. (Welte 2008, 29)

Gammafördelningen kan modelleras som en summa av exponentialfördelningar om gammafördelningen har en formparameter, α , som är ett heltal. Om formparametern inte är ett heltal finns metoder för att ändå approximera denna modell. Genom att dela upp fysiska stadier i virtuella delstadier, som var och en är exponentiellt fördelade kan fysiska stadier approximeras som gammafördelade med en kedja av exponentiellt fördelade, virtuella stadier. På det här sättet kan därmed en Markov-

process approximeras med en semi-Markov-process. I och med att nedbrytning av komponenter inte kan övervakas kontinuerligt införs med fördel dessa delstadier. Detta åskådliggörs i figur 16 nedan. De fysiska stadierna är indexerade med j och de virtuella med i . (Welte 2008, 29)



Figur 16. Fysiska och virtuella stadier samt resulterande Markov-process (Welte 2008, 30)

Det finns många fördelar med att använda sig av gammalfördelningen. En fördel är att gammalfördelningen har en mer flexibel form jämfört med andra fördelningar. Då nerbrytning är orsakad av sekvenser av tillstötande händelser ger gammalfördelningen en trovärdig modell. Detta överensstämmer med en del felmekanismer men inte med alla. Gammalfördelningen ger en balanserad kompromiss mellan olika felmekanismers egenskaper vilket är viktigt vid framtagning av en generell underhållsmodell. För en form-parameter $\alpha > 1$, har fördelningen en ökande felfrekvens, som ofta speglar verkligheten. (Welte 2008, 29)

För att modellera en sannolikhetsfördelning för återstående levnadstid kan gammalfördelningen alltså anses som lämplig (Welte et al. 2011, 2 eller 29).

Då det inte finns tillräcklig data för att uppskatta levnadskurvor kan expertgruppers utlåtanden användas. Parametrar till fördelningar, såsom exempelvis α och β till gammalfördelningar, kan dock upplevas ytterst abstrakt för icke-statistiker och de är nästintill omöjligt att uppskatta. Därmed är det uteslutet att fråga efter sådana parametrar då expertgrupper tillfrågas. Generellt är det svårt att estimeras sannolikhetsfördelningars parametrar. Det som expertgrupper kan uppskatta något så när är medelvärden, medianer och percentiler. (Welte 2008, 34)

De medelvärden och percentiler som expertgrupper uppskattar kan matchas mot en gammafördelning. Gammafördelningens täthetsfunktion:

$$f(t) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} \cdot t^{\alpha-1} \cdot e^{-t/\beta} \quad (1)$$

$$0 < t < \infty$$

α ger formen på kurvan och β skalan

α kan uttryckas med förväntat medelvärde och varians

För en gammafördelad slumpvariabel X ges väntevärdet $E(X)$ och variansen $\text{Var}(X)$ av:

$$E(T) = \alpha\beta \quad (2)$$

$$\text{Var}(T) = \alpha\beta^2 \quad (3)$$

(Welte 2007, 2)

Expertutlåtanden kan vara en källa till fel i modeller eftersom de bedömningar som görs bygger på tro och förväntningar. Fel i expertutlåtanden kan leda till systematiska fel, så kallade bias. Över- och underskattningar är typiska bias. Försök till kompensation för dessa systematiska fel kan eventuellt vara eftersträvansvärt och kan eventuellt göras om magnituden av felet är kända. Experter har en förmåga att vara överdrivet självsäkra när det gäller uppskattningar, speciellt då det rör sig om svåra saker vilket är allmänt känt. Tyvärr är det i dessa svåra situationer som efterfrågan av expertutlåtanden är som störst. Det finns inte någon riktigt bra lösning på detta problem men Welte nämner sin avhandling *Deterioation and Maintenance Models for Components in Hydropower Plants* Meyer och Brookers tumregler för tolkning av expertutlåtanden. Dessa tumregler kan vara bra att ha i åtanke. (Welte 2008, 34-35)

- När experter uppskattar 5:e och 95:e percentilen tillhandahåller de egentligen endast 30-40:onde och 70-60:onde percentilen.
- När experter uppskattar maximum och minimum värden tillhandahåller de egentligen 5-10:e percentilen och 95-90:onde percentilen.
- När experter ger sin bästa centrala uppskattning är det i verkligheten ett värde som snarare korresponderar med medianvärdet snarare än ett medelvärde.
- När experter ger en varians, är det egentligen mindre än halva variansen som representeras.

En rekommendation utifrån dessa tumregler är att använda experternas bedömning av medellivslängden som ett medianvärde av livslängden och 10-percentilen som 25-percentilen. (Welte 2008, 34-35)

Trovärdigheten hos expertgruppers bedömningar kan ifrågasättas då de ofta är dessa människor som är ansvariga för den nuvarande underhållsstrategin. Det kan innebära att de bedömningar som görs är kraftigt präglade av nuvarande tillvägagångssätt snarare än faktiska underliggande ingenjörsmässiga fenomen. Men trots dessa tveksamheter med expertunderlag måste kunskap/information finnas för att analyser ska kunna göras. Om det inte finns data att tillgå återstår ingenjörernas fälterfarenhet som den bästa källan till kunskap. Slutsatsen av detta resonemang är att expertgruppens erfarenhet är det man får bygga analyser på till dess att en gedigen databas över felstatistik inom vattenkraften byggts upp. (Welte 2008, 55)

2.5 Bayesiansk modellering

Bayesiansk modellering är en metod som är funktionell då expertutlåtanden och/eller data är det som finns att tillgå. Som ramverk för en sådan modell, som exempelvis kan användas för att ta fram uppehållstider, används sannolikhetsfördelningsfunktionen, $f(t;\theta)$, där parametern, θ , symboliserar en vektor med fördelningsparametrar. Parametrarna är stokastiska variabler och representeras av en så kallad "state-of-knowledge" fördelning $\pi(\theta)$. Fördelningen, $\pi(\theta)$, beskriver osäkerheten hos fördelningsparametrarna och $f(t;\theta)$ beskriver variationen hos uppehållstiderna. Om eller när ny information finns att tillgå kan $\pi(\theta)$ uppdateras med hjälp av Bayes teorem:

$$\pi(\theta|INFO) = \frac{L(\theta|INFO) \cdot \pi(\theta)}{\int L(\theta|INFO) \cdot \pi(\theta) \cdot d\theta} \quad (4)$$

INFO, betyder här information såsom expertutlåtanden och data. $\pi(\theta|INFO)$ är fördelningen med given information och $\pi(\theta)$ är fördelningen innan insamlad information. $L(\theta|INFO)$ representerar en likelihood-funktion där insamlat data är med i beräkningarna. Uppskattningen med Bayes kan användas som den bästa uppskattningen av uppehållstidernas fördelningsparametrar.

Likelihood-funktionen $L(\theta|INFO)$ består av information av expertutlåtanden och/eller insamlat data. $L(\theta|INFO)$ kan därmed delas upp i två delar.

$$L(\theta|INFO) = L(\theta|EXP\&DATA) = L(\theta|EXP) \cdot L(\theta|DATA) \quad (5)$$

Information från experter betecknas EXP och tillgänglig insamlad data betecknas med DATA. (Welte och Eggen 2008, 2)

2.6 Exempel nuvärdesberäkning

Givet en analysperiod P kan en nuvärdesberäkning av en åtgärds kostnad, K_N , som genomförs i början av år, N , beräknas på följande sätt:

$$NV(K_N) = K_N \cdot \varepsilon_{R,L} \cdot \lambda_{R,P-N+1} \cdot \alpha_{R,N-1}$$

Där:

$NV(K_N)$	Representerar nuvärdet av åtgärds kostnaden K_N i analysperioden P (justerat för restvärde vid analysperiodens slut)
K_N	Representerar kostnad för åtgärd år N (nominellt värde)
N	Representerar tidpunkten för åtgärd (början av år N i analysperioden)
P	Representerar analysperioden (antal år)
R	Representerar diskonteringsränta (%)
L	Representerar ekonomisk levnadstid
$\varepsilon_{R,L}$	Representerar annuitetsfaktor med diskonteringsränta och ekonomisk levnadstid
$\lambda_{R,P-N+1}$	Kapitaliseringsfaktor med diskonteringsränta R och kapitaliseringsperiod $P-N+1$ år, d.v.s. resterande år i analysperioden f.o.m året då åtgärd vidtogs
$\alpha_{R,N-1}$	Diskonteringsfaktor med diskonteringsränta R och diskonteringsperiod $N-1$ år, d.v.s. resterande år i analysperioden f.o.m året då åtgärd satts in

I denna formel tas hänsyn till den tidpunkten då åtgärden utförs och det eventuella restvärde av åtgärden som finns kvar vid analysperiodens slut. Antag ett scenario där en åtgärd som kostar 100 000 kr planeras att utföras år 5. Analysperioden antas vara 20 år och den ekonomiska levnadstiden på åtgärden är 20 år. Diskonteringsräntan i exemplet antas vara 4,5 procent. Eftersom den ekonomiska levnadstiden sträcker sig längre in i framtiden än analysperioden kommer åtgärden att ha ett restvärde efter analysperiodens slut, år 21.

$$\text{Annuitet} = B_N \cdot \varepsilon_{4,5,20} = 100\,000 \cdot 0,077 = 77\,000 \text{ kr}$$

$$\text{Restvärde}_{\text{år}21} = \text{Annuitet} \cdot \lambda_{4,5,4} = 77\,000 \text{ kr} \cdot 3,59 = 27\,600 \text{ kr}$$

$$Kostnad_{\text{år}5} = \text{Annuitet} \cdot \lambda_{4,5,16} = 7\,700 \cdot 11,23 = 86\,500 \text{ kr}$$

$$Kostnad_{\text{år}1} = Kostnad_{\text{år}5} \cdot \lambda_{4,5,4} = 86\,500 \cdot 0,84 = 72\,700 \text{ kr}$$

(Solvang och Istad 2013, s. 29-30)

3 Metod

I detta kapitel redogörs för tillvägagångssättet för examensarbetet.

Genom litteraturstudie av tidigare forskning inom underhåll valdes tre lämpliga teorier ut för att underbygga detta arbete. De utvalda blev RCM, CBM och FRAM-modellen. FRAM-modellen bygger på estimering av livslängder hos komponenter för att utifrån det möjliggöra optimering av underhåll. Denna modell är framtagen specifikt för underhåll inom vattenkraft och grundar sig på RCM och CBM.

För att kunna ta fram levandskurvor krävs ett gediget dataunderlag vilket är en brist inom branschen. Eftersom så är fallet även i Finnfors har alternativa tillvägagångssätt undersökts och målsättningen är att i framtiden införa ett tillståndsbaserat arbetssätt. En metod som utvecklats av SINTEF Energi är att kombinera en expertgrupps utlåtande med statistiska metoder/modellering för att motivera till datainsamling hos kraftbolagen. Den har utprovats på ett antal vattenkraftverk i Norge. Efter konsultation med seniorprofessor Eivind Solvang och forskaren Thomas Welte, båda engagerade i framtagandet av FRAM-modellen, fattades beslutet att använda deras verktyg för att ta fram levnadskurvor och kostnads kalkyler.

Vid sidan av de teoretiska studierna har ett antal intervjuer och samtal med berörda inom Skellefteå Kraft ägt rum. De samlade erfarenheter som finns inom verksamheten ligger som grund för detta examensarbete. Det tekniska kunnandet och de praktiska erfarenheter som de anställda innehar och delat med sig av är avgörande för arbetets relevans och resultat. Intervjuer har även ägt rum med en seniorprofessor och en forskare vid SINTEF Energi AS i Norge. Följande personer har intervjuats och därmed varit mer eller mindre delaktiga i processen med framtagandet av ett riskbaserat underlag för beslutsfattning av framtida åtgärder, se tabell 3 nedan.

Tabell 3. Namnen på de personer som intervjuats under examensarbetet.

Namn	Titel
Lars Bohlin	Gruppchef ET (SEU)
Pär Forsberg	Affärsenhetschef PH (SK)
Per Gunnebrink	Projekt och utredningsingenjör (SK)
Erland Johansson	Projekt och utredningsingenjör (SK)
Örjan Karlsson	Gruppchef EH (SEU)
Johan Lindberg	Optimeringsingenjör (SK)
Johan Lundström	Anläggningsansvarig PH (SK)
Håkan Marklund	Driftingenjör EH (SEU)
Daniel Norberg	Avdelningschef EXU (SEU)
Eivind Solvang	Seniorforskare (SINTF Energi AS)
Frida Stenlund	Projektledare (SK)
Thomas Welte	Forskare (SINTF Energi AS)

Flera studiebesök har gjorts på Finnfors kraftstation men studiebesök har även gjorts på andra anläggningar inom koncernen.

3.1 Kartläggning av dagens underhåll på Finnfors Kraftstation

En kartläggning av hur underhållsarbetet ser ut idag gjordes tidigt för att skapa en god förståelse för vad som görs, varför det görs och hur det kan göras. Det vardagliga underhållsarbetet planeras och utförs av drifts- och underhållspersonal. Vissa åtgärder utförs av inhyrd personal medan andra åtgärder utförs av egen personal.

Större förebyggande renoveringsåtgärder (livstidsförlängande åtgärder) planeras av projektansvariga ingenjörer på Skellefteå Kraft i samråd med berörda, bland annat driftsansvariga, anläggningsägare och enhetschef. En renovering ses som en åtgärdande underhållsåtgärd och har därmed betydligt kortare beslutsväg än en reinvestering. En renoveringsåtgärd ses dock som en investering och kan på så sätt avskrivas.

Beslut om reinvestering är en omfattande process med anbudsförfaranden och med många affärsområden inblandade. Det är i regel flera olika anbud som utvärderas och till sist är det upp till styrelsen att fatta beslut. Tiden från initierande av en reinvesteringsprocess till en genomförd reinvestering beräknas ta två och ett halvt till tre år. En reinvestering av en turbin är en mycket kostsam åtgärd.

Dagens periodiska underhållsarbete på Finnfors består av ronder, inspektioner och översyner. Underhållet är tidsplanerat, det vill säga att inspektioner och översyner sker alltid med samma intervall oavsett tidigare kondition på komponenterna.

Ronder utförs varje vecka och innebär att en rad kontroller görs. En punktlista med 170 punkter går igenom och mätvärden knappas in på en handdator. Mätvärden såsom oljenivåer och temperaturer på lager avläses, filter kontrolleras och kontrollören lyssnar och känner för att eventuella avvikelser ska upptäckas. Detta underhåll ses som ett löpande operatörsunderhåll och huvudsyftet är att vara närvarande för att kunna se, dofta, lyssna och känna. Mätvärden från ronder förs in i en databas och kan analyseras för att upptäcka trender av olika slag. En utveckling av dessa analyser kan vara givande för det övriga underhållsarbetet.

Inspektion av aggregat görs en gång per år. Vid en inspektion stoppas turbinen och de delar som ligger ovanför vattennivån ses över. Underhållet består av rengöring, testning av tryckvakter och oljetryckskapacitet, elektrisk övervakning med mera.

Översyn av löphjul görs vart tredje år. Vid en översyn töms turbinen på vatten vilket medför att löphjul, löphjulskammare och ledskovlar kan kontrolleras. En översyn innebär att aggregatet är taget ur produktion i cirka 12 dagar. Det som kontrolleras under en översyn är bland annat eventuellt oljeläckage från löphjulsnav. Vid en översyn mäts även avståndet mellan löphjulsskovlarna och löphjulskammare och undersökning av eventuella kavitationsskador på löphjulsskovlar och löphjulskammare utförs. Om det uppstått kavitationsskador svetsas dessa på en gång vilket medför att stoppet kan komma att förlängas. Kavitationsskador anses dock inte vara något stort problem i Finnfors G2. En översyn innehåller dessutom mätning av ledkransskovlarnas spel, lagertryckning och kontroll av uppstartstider.

Långtidsplanering för större framtida åtgärder, såsom reinvesteringar, av vattenkraftsaggregat i Skellefteå Krafts ägor bygger på de enskilda aggregatens ålder, utrustningens kondition, riskbedömningar, aggregatens tillförlitlighet och tidigare erfarenheter.

3.2 Antagande angående underhållsåtgärder

Ett antagande som tagits i detta examensarbete är att rutinmässigt underhåll, som exempelvis rengöring och smörjning, inte förbättrar det tekniska tillståndet men minskar på nedbrytningstakten enligt Weltes utsago. Detta rutinmässiga underhåll antas därmed vara en självklar del i komponentens livskurva och tas därför inte upp i de ekonomiska beräkningarna. Däremot antas förbättrande underhåll, där det tekniska tillståndet förbättras, inte ingå som en självklar del i modellen. Det är lönsamheten av ett sådant förbättrande underhåll som analyserats i detta examensarbete. De expertutlåtanden och datainsamling som samlats in bygger på att inget sådant tekniskt förbättrande underhåll ägt rum. (Welte och Eggen 2008, 3)

I och med detta antagande har ronder, inspektioner och översyner antagits som en naturlig del i utrustningens livscykel. Dessa underhållsaktiviteter är dock oerhört viktiga beståndsdelar för ett tillståndsbaserat arbetssätt. Det är under ronder,

inspektioner och översyner som status på komponenter kartläggs och begynnande fel kan upptäckas och nedbrytningstakten kan utforskas. Dessa underhållsaktiviteter fyller en enormt viktig funktion då tillståndsbaserat underhåll praktiseras. Med ett tillståndsbaserat arbetssätt kan även inspektioner och översyner planeras in på ett mer kostnadseffektivt sätt genom att planera in frekvensen av dem utifrån utrustningens kondition i stället för att utföra dem periodiskt. Det vill säga glesare mellan översynerna då inga tecken på nedbrytning finns och tätare mellan översynerna då nedbrytningen kommit längre och utrustningen närmar sig slutet.

3.3 Antagande angående svikt/haveri

I detta case används följande definition av svikt/haveri. Ett haveri av löphjulet-glandring (inre- och yttre lagringar) innebär att tätningar och lagringar ger efter och resulterar i ett betydande oljeläckage. Den viktigaste faktorn att ta hänsyn i detta fall är miljöaspekten. Ett stort oljeläckage måste naturligtvis undvikas och läckaget blir därmed en ekonomisk fråga. De åtgärder som kan utföras är antingen en akut renovering eller en steloperation för att turbinen ska kunna gå tills ett nytt löphjul installerats. Med steloperation menas att löphjulsskovlarna stumsvetsas och löphjulet fungerar då som en propellerturbin som inte kan regleras. Denna åtgärd tar cirka en arbetsvecka och medför förlorad reglerstyrka och en verkningsgrad på cirka 75 procent av maxeffekt, alltså förlorade MWh. Leveranstiden för ett nytt löphjul/turbin är cirka 2,5-3 år. I detta arbete har renoveringsalternativet uteslutits som ett alternativ vid ett haveri. Här har antagandet att ett haveri skulle innebära en steloperation av löphjulet tills dess att ett nytt löphjul kan installeras tagits.

Finnfors kraftstation är idag en flaskhals i Skellefteälvens produktion och en steloperation skulle innebära ytterligare en försämring.

3.4 Driftkritiska komponenter

Under samtal med erfarna driftstekniker på Finnfors kraftstation valdes turbinen G2 i Finnfors Kraftverk ut som objekt för detta arbete. Turbinen i Finnfors valdes på grund av sin ålder. En turbin beräknas ha en levnadstid på cirka 40 år innan större åtgärder måste vidtas och G2 Finnfors närmar sig den dagen. Bakgrundsfakta till turbinen såsom tillverkare, konstruktionsår och design samlades in och en kartläggning av driftkritiska komponenter genomfördes. De driftkritiska komponenterna vilka fokus i detta arbete legat på är följande:

- 1 Löphjul (skovlar, nav och inre- och yttre lagringar)
- 2 Turbinaxel (koppling och bultförband)
- 3 Löphjulskammare
- 4 Ledkransskovlar
- 5 Pådragscylinrar
- 6 Packbox

- 7 Turbinstyrager
- 8 Tryckoljesystem
- 9 Kombinator
- 10 Styrverk

3.5 Aktuella skadetyper för G2

Nästa steg i arbetet var att undersöka vilka olika skadetyper och tillhörande felorsaker de valda komponenterna vanligtvis utsätts för och vilka orsakerna kan vara samt att bedöma möjliga konsekvenser av dessa skadetyper. Normalt slitage, läckage, sprickor, skador på lagerytor, funktionsavvikelse är de skadetyper som valdes ut som de mest aktuella för just turbinen G2 i Finnfors. Denna kartläggning av skadetyper grundar sig på *Håndbøker for tilstandskontroll av vannkraft (2014)* och på samtal med driftsingenjör och expertgruppen. Besluten bygger därmed på experternas erfarenheter av turbiner i Skellefteå Krafts vattenkraftverk i allmänhet och Finnfors G2 i synnerhet. Aktuella felorsaker till de valda skadetyperna ansågs vara kavitation, mekaniskt slitage, korrosion, läckage, vibrationer, trasiga tätningar och mekanisk beläggning.

En expertgrupp bestående av erfarna personer på Skellefteå kraft sattes ihop, se tabell 4. På expertmötet som hölls bestämdes den förväntade återstående medellivslängden för varje vald komponent med respektive 10-percentil. En kartläggning av konsekvenser av fel gjordes också. Denna kartläggning vilar på erfarenheter på Skellefteå Kraft och har diskuterats under intervjuer med driftsingenjörer men även under expertmötet.

Tabell 4. Personer som ingått i Expertgruppen.

Namn	Titel
Erland Johansson	Projekt och utredningsingenjör (SK)
Örjan Karlsson	Gruppchef EH (SEU)
Johan Lundström	Anläggningsansvarig PH (SK)
Richard Malm	Utvecklingsingenjör (SK)
Håkan Marklund	Driftingenjör EH (SEU)

3.6 Uppskattning av levnadskurvor

Med hjälp av expertgruppens uppskattade förväntade återstående medellivslängder (MRL) och 10-percentiler, som anger tillhörande osäkerhet, uppskattades så levnadskurvor för de valda komponenterna med hjälp av EFP. EFP är ett dataverktyg som är utvecklat av SINTEF i Excel och Matlab för att estimeras felsannolikhet hos olika komponenter i vattenkraftsaggregat baserat på levnadskurvor. I programmet finns tre huvudsakliga val för att uppskatta

felsannolikhet. I detta arbete har en enkel bedömning av levnadskurvor för de kritiska komponenterna i turbinen använts för att estimeras felsannolikheterna. Dessa parametrar har sedan använts i EFP för att generera förväntade levnadskurvor till respektive kritisk komponent. (Welte et al. 2011, 7)

För att kunna uppskatta parametrar till en tvåparametrisk sannolikhetsfördelning behövs mer än bara den bästa uppskattningen av återstående medellivslängd. Därför har även 10-percentilen efterfrågats i detta fall. 10-percentilen hänvisar till tidiga fel hos komponenter. (Welte och Eggen 2008, 3)

Dessa levnadskurvor har gett sannolikhetsfördelningar som ligger till grund för lönsamhetsberäkningarna och användes även för att bestämma när i tid en underhållsåtgärd bör planeras in.

Det bör påpekas att expertgruppen inte tidigare uppskattat återstående medellivslängder med tillhörande 10-percentil. Med detta i åtanke bör bedömningarna handskas med stor försiktighet då felmarginalen kan vara betydande.

3.7 Case-beskrivning

De återstående medellivnadskurvor som uppskattats med EFP har sedan använts för att beräkna lönsamhet i form av nuvärdet på förebyggande underhållsåtgärder såsom renovering och reinvestering av löphjulet G2 i Finnfors. Utifrån en förutbestämd risktolerans har även denna felsannolikhetsfördelning använts för att beräkna vilken kostnadsreducering som en åtgärd bidrar med i lönsamhetsberäkningen.

Utifrån de framtagna levnadskurvorna för de kritiska komponenterna har olika case tagits fram för att analyseras. Tanken med analysen är att den ska kunna fungera som stöd för framtida beslut vid planering av underhåll och investeringar. De olika casen som har analyserats är renovering, reinvestering eller inte göra något (referensalternativet).

3.7.1 Alternativ 1 - referensalternativ

Referensalternativet innebär att ingen åtgärd vidtas.

3.7.2 Alternativ 2 – renovering av löphjul 2018

Vid en förutbestämd tidpunkt antas en renovering av löphjulet utföras med syftet att förlänga återstående levnadstid, MRL, av turbinen. MRL förväntas då bli 15-20 år. Vad som exakt ingår i en sådan typ av renovering är svårt att säga i förväg, det är en bedömningsfråga vid start av renoveringen. Kostnader för renovering och dess omfattning är därmed svåra att uppskatta. Tidigare erfarenheter visar att delar hos löphjulet som ofta ingår i en renovering av detta slag är lager, tätningar, kavitationsskador och servot. Man passar ofta även på att renovera delar av pådragsmekanismen såsom ledskovlarnas övre lagring och pådragscylindrar. Dessa komponenter är även de som anses vara mest kritiska, med kortast återstående MRL, i Finnfors G2 enligt expertutlåtanden. I detta alternativ antas därmed ovan nämnda åtgärder ingå i renoveringen. Utöver dessa kritiska komponenter anses även kombinatorn som ett eventuellt renoveringsobjekt i och med trasiga tätningar och tas därmed även med i analysen. Denna renovering av löphjulet med tillhörande utrustning antas kosta cirka 8 miljoner kronor.

3.7.3 Alternativ 3 – reinvestering löphjul 2018

Vid en förutbestämd tidpunkt antas en reinvestering av löphjulet. MRL blir då 40 år enligt garantier från leverantörer och en sådan åtgärd antas kosta 80 miljoner kronor. Hela processen med upphandling, förberedelsearbete, tillverkningstid och installation uppgår till nästan 3 år. Bara tillverkningstiden beräknas ta 2 år. Själva installationen beräknas ta 6-9 månader.

3.7.4 Alternativ 4 – renovering löphjul 2018 och reinvestering löphjul 2036

Alternativ 4 innebär att en renovering utförs 2018 och en reinvestering utförs 2036. I och med att den ekonomiska livslängden av analysperioden på 30 år är längre än vad den nya livslängden för komponenten är efter utförd renovering 2018 görs antagandet att behovet av ytterligare en åtgärd blir aktuell. I detta alternativ har en reinvestering valts som en andra åtgärd. En renovering ger löphjulet ett MRL=20 och en reinvestering ger löphjulet ett MRL=40.

3.7.5 Alternativ 5 – renovering löphjul 2018 och 2036

I detta alternativ utförs renovering av löphjulet 2018 och 2036. En renovering ger löphjulet ett MRL=20. På grund av att den ekonomiska livslängden av analysperioden på 30 år är längre än vad den nya livslängden för komponenten är efter utförd renovering 2018 görs antagandet att behovet av ännu en åtgärd blir aktuell. I detta alternativ har ytterligare en renovering valts som en andra åtgärd.

3.8 Lönsamhetsberäkningar av de olika casen

Med hjälp av SINTEF Energis verktyg NPV (Net present value, calculation of profitability) har så lönsamhetsberäkningar för de olika casen gjorts. Utifrån de sannolikheter och levnadskurvor som uppskattades med EFP kunde så en kostnadsberäkning av framtida åtgärder göras. Kostnadsberäkningar gjordes på de fem casen som tidigare beskrivits.

Diskonteringsräntan är ofta branschspecifik och bestäms utifrån vilken framtidstro man har angående prisutveckling. Den diskonteringsränta som använts i nuvärdesberäkningarna är den som Skellefteå Kraft använder idag på 6,5 %. Inflation har inte tagits hänsyn till i dessa beräkningar.

NPV är ett verktyg som beräknar lönsamhet (nuvärdesanalys) av underhåll- och renoveringsprojekt. Verktöget är generellt och kan anpassas till analys av olika typer av projekt av någon installation. Det redogör inte för när en åtgärd bör utföras men tillhandahåller en uppskattning av hur lönsamt projektet är idag genom en nuvärdesberäkning. Kort sagt går tillvägagångssättet ut på att beräkna nuvärdet av olika projekt/åtgärder. Det är särskilt konstruerat för att kartlägga det ekonomiska värdet av reducerad felsannolikhet med åtföljande kostnad för fel. Metoden beräknar förtjänsten av en enskild åtgärd där resultaten av flera åtgärder ska kunna ställas mot varandra. Verktöget är uppbyggt av följande parametrar:

- Framtida elpris
- Förväntat årligt energitillflöde genom turbinen
- Drifttid
- Projektets ekonomiska livstid
- Sannolikhet för fel för referensalternativet samt efter utförd åtgärd
- Eventuell effekthöjning
- Kostnader för åtgärd (arbets- och materialkostnader)
- Sviktkostnader
- Kostnader för produktionsbortfall
- Diskonteringsränta

(Welte et al. 2011, 56)

De uppskattade framtida elpriser som använts i de ekonomiska beräkningarna i analysen kommer från analytiker på krafthandel på Skellefteå Kraft. Kostnader för produktionsbortfall bygger på dessa uppskattade elpriser och är framtagna med ett verktyg som optimeringsgruppen på Skellefteå Kraft tagit fram. Verktöget beräknar kostnaden för teknisk otillgänglighet, alltså förlorade intäkter, och används vid avställningsplanering och för att bedöma lämplig tidpunkt för arbeten utifrån ett kostnadsperspektiv.

Det förväntade årliga energitillflödet genom turbinen som antagits i modellen är fjolårets energitillflöde vilket på ett trovärdigt sätt motsvarar ett medelvattenflöde. Detsamma gäller för antagna driftstider.

Åtgärdsprojektens ekonomiska livstid utgår ifrån expertgruppens erfarenheter och bedömningar. Ett renoverat löphjul antas ha en medellevnadstid på cirka 20 år och ett nytt löphjul antas ha en medellevnadstid på 40 år.

Referensalternativets sannolikheter för fel och sannolikheter för fel efter utförd åtgärd som använts i beräkningarna kommer från EFP-beräkningarna.

I Kalkylbladet i NPV-verktyget har renoverings- och reinvesteringsåtgärder planerats in år 2018. Enligt den uppskattade sannolikhetsfördelningen har löphjulet 2018 uppnått en 14 % risk för haveri vid den tidpunkten vilket vi antagit som rimlig risktolerans, dock kanske något hög. En annan anledning till att just 2018 valdes som det år då en åtgärd planerats in är att förberedelsearbetet för en reinvestering ligger mellan 2-3 år. För en renovering anses inte förberedelsetiden vara lika lång.

Två olika svikt-/haverikostnader har använts i beräkningarna. Eftersom en svikt-/haverikostnad beror på så många olika parametrar som är okända har ett par olika sviktkostnader antagits. Den första sviktkostnaden som använts är ett så kallat "worst case" scenario där ett nytt löphjul med kringutrustning ingår tillsammans med en väl tilltagen portion oförutsedda kostnader. Den andra sviktkostnaden antas vara densamma som vid en planerad reinvestering. Dessa två olika sviktkostnader har legat till grund för lönsamhetsberäkningar i var sitt scenario där alla andra parametrar varit desamma. På så sätt har en känslighetsanalys av sviktkostnaderna tagits fram.

Det är de vinster i form av reducerad sannolikhet för sviktkostnader som är kopplade till underhållsåtgärder som ligger till grund för de ekonomiska lönsamhetsberäkningarna i denna modell istället för att enbart minimera kostnader. Traditionellt har det varit minskade kostnader som varit det mest vanliga tillvägagångssättet. I denna modell är det alltså besparingar eller senarelagda kostnader relaterade till en underhållsåtgärd som ses som en vedertagen inkomst eftersom den reducerar risken för kostnader i samband med haveri. Åtgärder som ger ökad verkningsgrad genererar även det framtida intäkter. Med en teknisk-ekonomisk analys som utförts i detta examensarbete har dessa framtida intäkter bestämts. (Solvang och Istad, 2013b, 27)

De utgifter för åtgärder som uppstår på grund av svikt representerar tillsammans med kostnad för produktionsbortfall den ekonomiska risken. Denna risk beräknas utifrån den årliga sannolikheten för svikt som bygger på de uppskattade levnadskurvorna. (Solvang och Istad 2013b, 27-28)

I NPV-verktyget beräknas dessa intäkter på följande sätt:

$$I_{fel,i} = (p_{ref,i} - p_{ny,i}) \cdot K_{fel} \quad (6)$$

Där intäkterna, $I_{fel,i}$, representerar inkomst i form av utebliven sviktkostnad, $p_{ref,i}$ sannolikheten för svikt i referensalternativet i tidpunkt i , $p_{ny,i}$ den nya sannolikheten för svikt komponenten fått år i efter åtgärd och K_{fel} kostnaden för svikt.

De antagna åtgärdskostnaderna som används i modellen kommer från liknande projekt som genomförts på Skellefteå Kraft. Kostnaderna som används här bygger därmed på erfarenhet men kan inte ses som något beständigt eftersom det ofta uppstår oförutsedda händelser vid större underhållsprojekt.

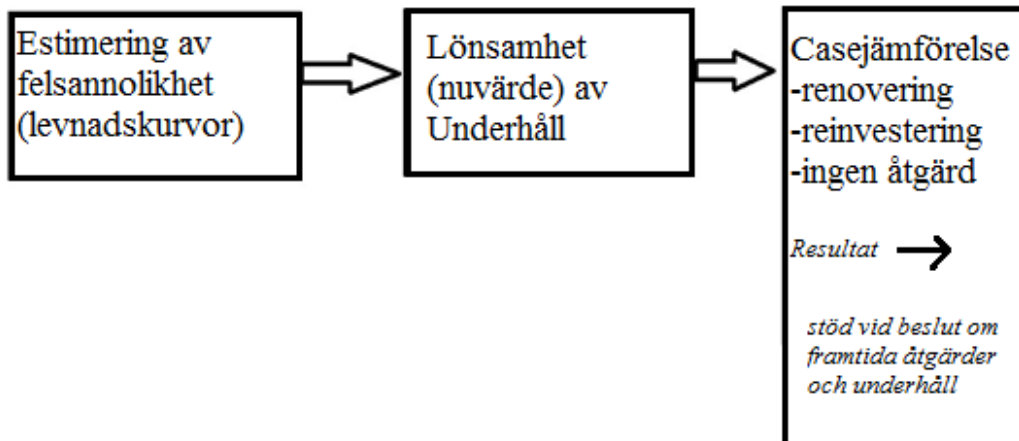
3.9 Känslighetsanalys

På grund av att de ekonomiska beräkningarna består av parametrar med stor osäkerhet har ett par känslighetsanalyser utförts. Dels har en känslighetsanalys där 10-percentilen varierats genomförts, dels en analys med olika sviktkostnader. Känslighetsanalysen där tre varianter av 10-percentilen jämförts har implementerats på case 3, reinvestering av löphjul. När 10-percentilen ändrats ändras också levnadskurvans form, sannolikhetsfördelningen förändras. 10-percentilen är den parameter som visar på osäkerheten då sannolikhetsfördelningen uppskattas. Analysen med varianter på 10-percentilen gjordes på grund av osäkerheten i hur lång levnad ett nytt löphjul anses ha. Ett nytt modernt löphjul byggs för att hålla i minst 40 år men osäkerheten kan vara stor. Nya löphjul är smäckrare i sin design och därmed eventuellt mindre robusta än gamla. Dessutom sliter dagens frekvenskörning mer på utrustningen än vad tidigare körmonster gjort vilket kan förkorta livslängden hos löphjul avsevärt. Vilken påverkan dessa två parametrar har på löphjulets livslängd är därmed osäker. Dagens löphjul byggs för att hålla minst 40 år men ännu har inget nytt modernt löphjul hunnit snurra så länge så därmed finns det ingen erfarenhet att falla tillbaka på.

Känslighetsanalysen då två olika sviktkostnader har jämförts mot varandra har genomförts på alla varianter av levnadskurvor vilka beskrivits ovan. De två sviktkostnader som antagits och legat till grund för denna känslighetsanalys beskrevs under steg 4. Denna känslighetsanalys utfördes för att kunna se hur stor inverkan konsekvenser av svikt har på lönsamheten kontra dyra förebyggande åtgärder.

4 Resultat

Det resultat som arbetet mynnat ut i är förstudie till en eventuell framtida implementation av FRAM-verktyget som stöd vid beslutsfattning. Arbetet visar i form av Case hur verktyget skulle kunna användas i olika investeringsprojekt och långtidsplanering. I figur 17 nedan illustreras de olika stegen för att nå fram till resultatet.



Figur 17. Tillvägagångssätt vid framtagning av beslutsunderlag.

4.1 Körning av NPV-programmet

I tabell 5 nedan visas de kostnader som antagits och använts vid beräkningarna i case-analysen för löphjulet. Den växelkurs som använts för att omvandla de förväntade framtida elpriserna, som var angivna i euro, till svenska kronor är 9,29 SEK/EUR. Datumet denna antagna växelkurs fastslogs var den 21 maj, 2015.

Tabell 5. Kostnader och otillgänglighet för planlagda åtgärder

Åtgärd	Ekonomisk Levnadstid (år)	Kostnad åtgärd utan produktionsbortfall (kkkr)	Kostnad för svikt, låg (kkkr)	Kostnad för svikt, "worst-case" (kkkr)
Alt. 2: Renovering Löphjul 2018	20	8 000	94 891	144 891
Alt. 3.1- 3.3: Reinvestering Löphjul 2018	40	80 000	94 891	144 891
Alt. 4: Renovering löphjul 2018, reinvestering löphjul 2036	20, 40	88 000 (80 000 + 8 000)	94 891	144 891
Alt. 5: Renovering löphjul 2018, 2036	20, 20	16 000 (8 000 + 8 000)	94 891	144 891

I tabell 5 presenteras kostnader som använts i de ekonomiska beräkningarna av de olika åtgärdsalternativen (Alt 2- Alt 3:3) samt de två olika sviktkostnaderna som använts i känslighetsanalysen. Alternativ 2 är det case då löphjulet renoveras 2018 med MRL= 20 och 10-percentil = 15. Alternativ 3:1 är det case där löphjulet reinvesteras och får en MRL = 40 och 10-percentil = 25. Alternativ 3:2 är det case där löphjulet reinvesteras och får en MRL = 40 och 10-percentil = 30. Alternativ 3:3 är det case där löphjulet reinvesteras och får en MRL = 40 och 10-percentil = 34,9. I alternativ 4 analyseras utfallet där en renovering sätts in 2018 och i och med att den nya livslängden på löphjulet förväntas vara kortare än analysperioden sätts en reinvestering in 2036. Alternativ 5 innebär att renoveringar planeras in 2018 och 2036.

Oberoende av om åtgärden är en renovering eller en reinvestering ska de utföras 2018 enligt beräkningarna i samtliga alternativ. Kostnaden för en planlagd renovering av löphjul med relevant kringutrustning antas vara 8 miljoner kronor, detta baseras på tidigare renoveringar inom Skellefteå Kraft. En reinvestering av löphjulet innebär att turbinkroppen med tillhörande system byts ut och denna kostnad antas vara 80 miljoner kronor, den baseras på ett medelvärde av tidigare upphandlingar som utförts av Skellefteå Kraft. De planlagda produktionsbortfallen vid renovering beräknas på en antagen stopptid på 30 veckor och motsvarande för reinvestering är 40 veckor. Produktionsbortfallen beräknas med ett verktyg utifrån förväntade framtida elpriser 30 år framåt, dessa är framtagna av Skellefteå Kraft.

I tabell 6 redovisas resultaten från de nuvärdesberäkningar som utförts med den lägre antagna sviktkostnaden. Kostnaden för alternativ 2, att renovera löphjulet 2018, beräknat med en låg sviktkostnad är enligt de nuvärdesberäkningar som gjorts 13,9 miljoner svenska kronor med en procentuell lönsamhet på 12,2 procent sett över en 30-årsperiod. Intäkterna i detta fall är de eventuella framtida kostnaderna som kan undvikas i och med att en åtgärd sätts in. I alternativ 2 är denna intäkt beräknad till 15,6 miljoner kronor. Med reducerad sviktkostnad menas att då en åtgärd vidtagits minskar sannolikheten för svikt och detta räknas då som en intäkt.

I alternativen 3:1 till 3:3 ligger kostnaden för en reinvestering i ett nytt löphjul 2018, beräknat med en låg sviktkostnad, på 68,4 miljoner kronor. Intäkterna kommer i form av en ökad verkningsgrad tillsammans med en reducerad sviktkostnad. I detta arbete har verkningsgraden antagits öka med 2,5 procent vilket resulterar i en intäkt på 11,5 miljoner svenska kronor för alternativen 3:1- 3:3. Med ökad verkningsgrad menas att vid en reinvestering kan utfallet bli en högre effekt vid samma fallhöjd och vid samma flöde genom turbinen.

Intäkterna i form av reducerade sviktkostnader varierar mellan de olika alternativen 3:1 till 3:3 i och med att de bygger på olika sannolikhetsfördelningar för fel. Alternativ 3:1 beräknas ha en intäkt på 46,2 miljoner svenska kronor och en procentuell lönsamhet på -32,5 procent. Summan av intäkterna i alternativ 3:2 beräknas till 48,2 miljoner svenska kronor och den procentuella lönsamheten beräknas ligga på -29,6 procent medan alternativ 3:3 har en procentuell lönsamhet på -28,6 procent och summan av intäkterna landar på 48,9 miljoner svenska kronor.

Alternativ 4, renovering 2018 och reinvestering 2036, har en beräknad procentuell lönsamhet på 134 procent. Summan av intäkterna beräknas till 59,6 miljoner kronor och summan av beräknade kostnader 25,4 miljoner kronor. Procentuell lönsamhet för alternativ 5 är 68,5 procent och summan av intäkterna beräknas till 59,6 miljoner kronor. Summan av de beräknade kostnaderna är 25,4 miljoner kronor. Sett till procentuell lönsamhet är alternativ 4 det bästa valet med 134,4 procent tätt följt av alternativ 5, renovering 2018 och 2036, med 68,5 procent. Reinvestering av löphjul, alternativ 3:1 till 3:3 är inte alls lönsamt enligt dessa beräkningar.

Tabell 6. Sammanställning av resultat med NPV-verktyget i nuvärde med en lägre sviktkostnad.

Analysperiod 2015-2045 med en lägre sviktkostnad (kk)						
	Alt 2	Alt 3:1	Alt 3:2	Alt 3:3	Alt 4	Alt 5
Tidpunkt för planerad åtgärd (år)						
Renovering av löphjul (år)	2018	-	-	-	2018	2018, 2036
Reinvestering av löphjul (år)	-	2018	2018	2018	2036	
Kostnader:						
Resurser (material, personal)	-6 623	-59 678	-59 678	-59 678	-16 802	-7 638
Otillgänglighet (produktionsbortfall)	-7 312	-8 764	-8 764	-8 764	-8 641	-8 808
Summa kostnad:	-13 935	-68 441	-68 441	-68 441	-25 442	-16 446
Intäkter:						
Ökad verkningsgrad	-	11 579	11 579	11 579	-	-
Reducerad sviktkostnad	15 628	34 601	36 630	37 287	59 633	27 875
Summa intäkter:	15 628	46 180	48 208	48 866	59 633	27 875
Resultat:	1 693	-22 262	-20 233	-19 575	34 190	11 429
Procentuell lönsamhet:	12,2%	-32,5%	-29,6%	-28,6%	134,4%	68,5%

Nedan i tabell 7 presenteras resultaten från de ekonomiska beräkningarna av de olika årgärdsalternativen (Alt 2-3:3) där en högre sviktkostnad antagits, ett "worst case" scenario. Alternativ 2, renovering av löphjul men en "worst case" sviktkostnad beräknas ha en intäkt på cirka 23,9 miljoner kronor, kostnader på 13,9 miljoner kronor och en procentuell lönsamhet på 71,2 procent.

Alternativ 3:1 beräknas ha intäkter på 64,4 miljoner kronor och totala kostnader på 68,4 miljoner svenska kronor. Alternativ 3:2 och 3:3 har samma kostnader som alternativ 3:1 men intäkterna skiljer sig åt något i och med att de tre alternativen har olika sannolikhetsfördelningar för svikt. Den procentuella lönsamheten för alternativ 3:1 till 3:3 ligger mellan -5,9 procent och 0,1 procent.

Alternativ 4 har en intäkt på cirka 67,2 miljoner kronor, totala kostnader på 25,4 miljoner kronor och en procentuell lönsamhet på 164,1 procent.

Alternativ 5 har en intäkt på 42,6 miljoner kronor, totala kostnader på 16,4 miljoner kronor och en procentuell lönsamhet på 158,8 procent.

I fallet med en "worst case" sviktkostnad är skillanden i procentuell lönsamhet relativt liten mellan alternativ 4 och 5. Det är dock alternativ 4 som är den mest lönsamma med 164,1 procent. Alternativ 5 har en procentuell lönsamhet på 158,8 procent och alternativ 2 kommer på tredje plats med en lönsamhet på 71,2 procent. Med en "worst case" sviktkostnad ligger även alternativ 3:3 på gränsen till lönsamhet med blygsamma 0,1 procent.

Tabell 7. Sammanställning av resultat med NPV-verktyget i nuvärde med en "worst case" sviktkostnad.

Analysperiod 2015-2045 med "worst case" sviktkostnad (kkkr)						
	Alt 2	Alt 3:1	Alt 3:2	Alt 3:3	Alt 4	Alt 5
Tidpunkt för planerad åtgärd (år)						
Renovering av löphjul (år)	2018	-	-	-	2018	2018, 2036
Reinvestering av löphjul (år)	-	2018	2018	2018	2036	-
Kostnader:						
Resurser (material, personal)	-6 623	-59 678	-59 678	-59 678	-16 802	-7 638
Otillgänglighet (produktionsbortfall)	-7 312	-8 764	-8 764	-8 764	-8 641	-8 808
Summa kostnad:	-13 935	-68 441	-68 441	-68 441	-25 442	-16 446
Intäkter:						
Ökad verkningsgrad	-	11 579	11 579	11 579	-	-
Reducerad sviktkostnad	23 863	52 833	55 931	56 935	67 191	42 564
Summa intäkter	23 863	64 412	67 509	68 513	67 191	42 564
Nettointäkter	9 928	-4 030	-932	72	41 748	26 117
Procentuell lönsamhet	71,2%	-5,9%	-1,4%	0,1%	164,1%	158,8%

4.2 Exempel på de beräkningar som utförts (steg-för-steg)

1. Till grund för genereringen av levnadskurvor ligger expertgruppens uppskattning av parametrarna återstående medellivslängd och 10-percentil för aktuell Kaplanturbin, se tabell 8.

Tabell 8. Återstående medellivslängd vid starten av analysperioden 2015 och återstående medellivslängd efter respektive åtgärd.

Komponenter	Skadetyper (Svikt)	Felorsaker	MRL	10-percentil	Känslighetsanalys 10-percentil
Nuläge löphjul	Oljeläckage	Mekaniskt slitage	5	1	-
Renovering löphjul	Oljeläckage	Mekaniskt slitage	20	15	-
Reinvestering löphjul	Oljeläckage	Mekaniskt slitage	40	34,9	25, 30

2. De medelvärden och percentiler som expertgruppen uppskattat har matchas mot en gammafördelning. Dessa fördelningar används sedan som levnadskurvor. Varför gammafördelningen valts har motiverats tidigare i rapporten under rubriken teori. Gammafördelningens täthetsfunktion ser ut enligt följande:

$$f(t) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} \cdot t^{\alpha-1} \cdot e^{-t/\beta}$$

Förväntad medellivslängd motsvarar i detta fall ett väntevärde $E(T)$ vilket kan beräknas enligt följande förhållande:

$$E(T) = \alpha\beta$$

Resultatet för referensalternativet då återstående medellivslängd uppskattas till 5 år och 10-percentilen till 1 år erhålls $\alpha = 1,53$ och $\beta = 3,26$. I tabell 9 nedan illustreras resultatet från programmet EFP. Resultatet för en förväntad återstående medellivslängd på 20 år och med en uppskattad 10-percentil på 15 år ger $\alpha = 24,21$ och $\beta = 0,83$, se tabell 10.

Tabell 9. Parametrar för referensalternativet (ingen åtgärd) vid generering av levnadskurvor i EFP.

Resultat för:	Gammafördelningen	
Formparameter:	alpha	1,53
	beta	3,26
	t	$F(t)$
10-percentil	1,00 år	10,000 %
Återstående medellivslängd	5,00 år	60,723 %

Tabell 10. Parametrar för renovering av löphjul vid generering av levnadskurvor i EFP.

Resultat för:	Gammafördelningen		
Formparameter:	alpha	24,21	
	beta	0,83	
	<i>t</i>		<i>F(t)</i>
10-percentil	15,00	År	10,000 %
Återstående medellivslängd	20,00	År	52,703 %

3. Den sannolikhetsfördelning som genererats med ovanstående parametrar motsvarar "dödligheten" hos en population likvärdiga Kaplan-turbiner. Referensalternativets sannolikhetsfördelning för svikt/fel, med ovan nämnda parametrar, kan ses i tabell 11. I tabell 12 kan motsvarande sannolikhetsfördelning för svikt/fel för alternativ 2, renovering av löphjulet, ses. I figur 18 illustreras referensalternativets sannolikhet för svikt och i figur 20 kan motsvarande felsannolikhet för alternativ 2 ses. Den kummulativa sviktsannolikheten för referensalternativet och alternativ 2 kan ses i figur 19 respektive figur 21.

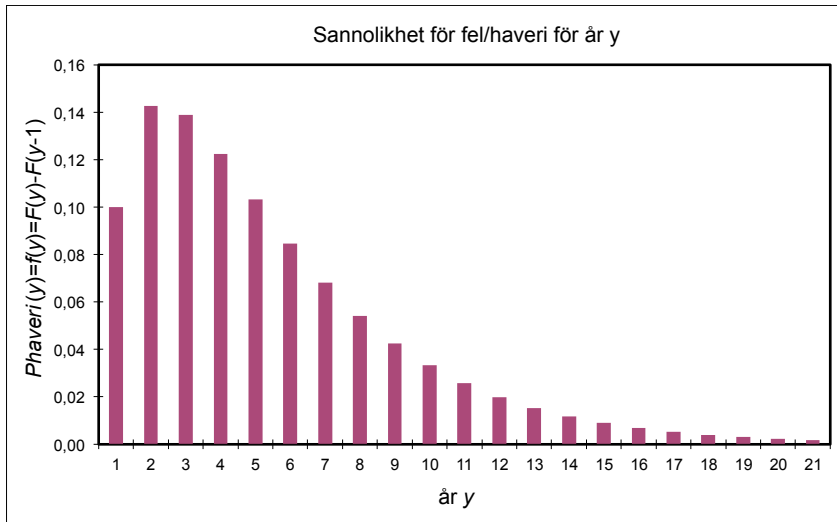
I figur 22 illustreras täthetsfunktionerna för referensalternativet (blå staplar) och alternativ 2, renovering av löphjul 2018 (vinröda staplar) tillsammans.

Tabell 11. Sannolikhetsfördelning för svikt för referensalternativet. MRL=5 och 10-percentil=1.

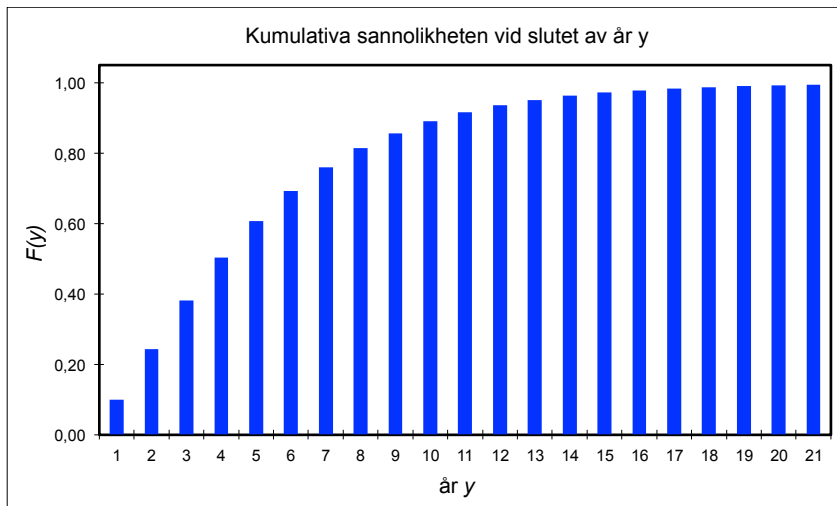
År	Sannolikhetsfördelning för svikt (ref. alt.)	Kummulativ sannolikhetsfördelning för svikt (ref. alt.)
1 (2015)	0,100000	0,100000
2	0,142695	0,242696
3	0,138809	0,381505
4 (2018)	0,122512	0,504017
5	0,103209	0,607226
6	0,084592	0,691818
7	0,068086	0,759904
8	0,054098	0,814002
9	0,042571	0,856573
10	0,033251	0,889824
11	0,025816	0,915640
12	0,019946	0,935586
13	0,015349	0,950935
14	0,011770	0,962705
15	0,008999	0,971704
16	0,006863	0,978568
17	0,005223	0,983790
18	0,003966	0,987757
19	0,003007	0,990764
20	0,002276	0,993040
21	0,001721	0,994761

Tabell 12. Sannolikhetsfördelningen för svikt för alternativ 2, renovering av löphjul 2018. MRL=20 och 10-percentil=10.

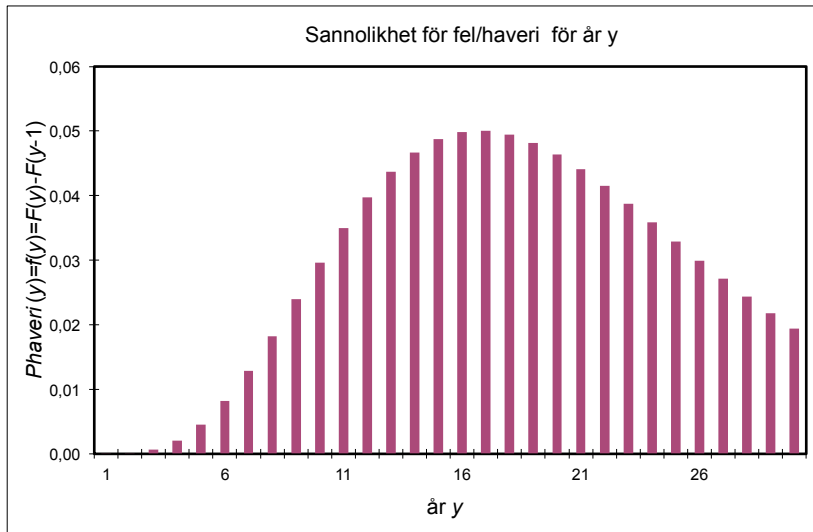
År	Sannolikhetsfördelning för svikt (alt. 2 renovering 2018)	Kummulativ sannolikhetsfördelning för svikt (alt 2, renovering 2018)
1 (2018)	0	0
2	0	0
3	0,000633	0
4	0,002005	0
5	0,004494	0
6	0,008150	0,015388
7	0,012818	0,028206
8	0,018202	0,046408
9	0,023938	0,070347
10	0,029653	0,1
11	0,035014	0,135014
12	0,039752	0,174766
13	0,043679	0,218445
14	0,046684	0,265129
15	0,048724	0,313852
16	0,049817	0,363669
17	0,050026	0,413695
18	0,049443	0,463139
19	0,048182	0,511321
20	0,046363	0,557684
21	0,044108	0,601792
22	0,041532	0,643324
23	0,038743	0,682067
24	0,035834	0,717901
25	0,032884	0,750785
26	0,029960	0,780745
27	0,027116	0,807861
28	0,024390	0,832251
29	0,021814	0,854065
30	0,019406	0,873471



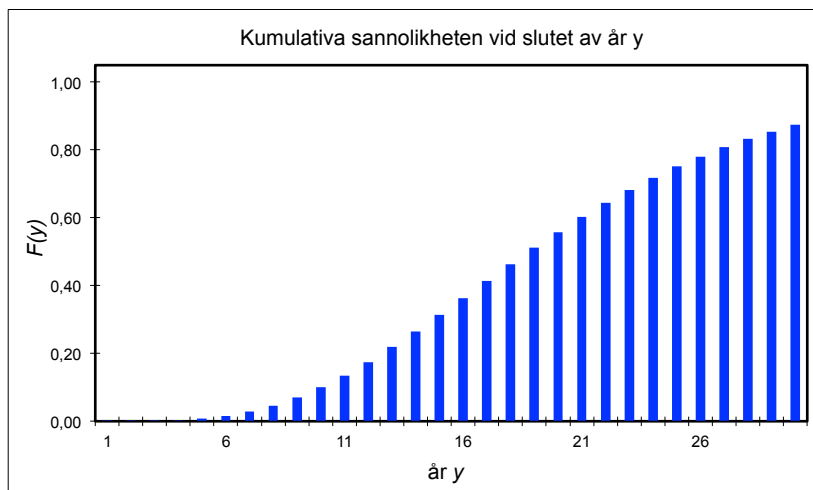
Figur 18. Sannolikhetsfördelning för svikt från 2015 och framåt, referensalternativet.



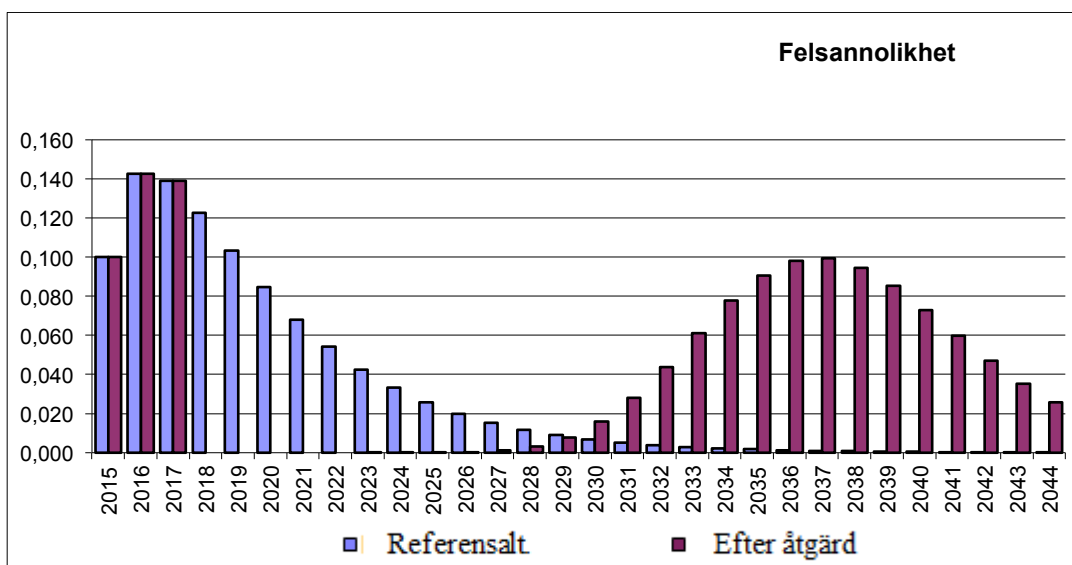
Figur 19. Kumulativa sannolikhetsfördelningen för svikt för referensalternativet (ingen åtgärd av löphjulet)



Figur 20. Sannolikhetsfördelning för svikt efter en reovering med början år 2018.



Figur 21. Kumulativa sannolikhetsfördelningen för svikt efter reovering av löphjul från år 2018 och framåt.



Figur 18. Sannolikhet för fel/haveri under perioden 2015-2044 för referensalternativet och för åtgärdsalternativet (renovera löphjulet 2018). Vid jämförelse mellan sannolikheten för svikt i referensalternativet med motsvarande för renoveringsalternativet ser man att sannolikheten försvinner 2018 då renovering utförts. 2027 börjar sannolikheten för svikt att växa igen för att nå sin kulmen 2037 för renoveringsalternativet. För referensalternativet har populationen av löphjul ”dött ut” 2038.

- De ekonomiska nuvärdesberäkningarna består av ett uppskattat framtida elpris (uppskattat av Skellefteå Kraft), kostnader för respektive planerad åtgärd, kostnad för akut åtgärd – en sviktkostnad, uppskattad kostnad för produktionsbortfall (uppskattat av Skellefteå Kraft) samt ekonomisk levnadstid. Den ekonomiska levnadstiden för en renovering motsvarar hur länge utrustningen förväntas kunna fungera obehindrat. I fallet med renovering av löphjulet förväntas åtgärden hålla cirka 20 år, se tabell 13.

Tabell 13. Uppskattade kostnader för renovering av löphjul 2018.

Åtgärd	Ekonomisk levnadstid (år)	Kostnad åtgärd 2018 (kkr)	Uppskattat produktionsbortfall 2018 (kkr)	Total kostnad 2018 (kkr)	Nuvärde av total kostnad 2015 (kkr)	Kostnad för svikt, ”worst-case” (kkr)
Alt. 2: Renovering Löphjul 2018	20	8 000	8 832	16 832	13 934	144 891

De kostnader som återges i beräkningarna bygger på vad liknande åtgärder inom Skellefteå Kraft kostat vid liknande

åtgärder. Kostanderna för åtgärd och uppskattad sviktkostnad består av materialkostnader, personalkostnader samt uppskattning av produktionsbortfallskostnader. Dessa kostnader beräknas komma 2018 och har nuvärdesberäknas till idag. Den diskonteringsränta som använts i beräkningarna är 6,5 procent.

Sviktkostnaderna är på samma sätt antaganden som bygger på vad tidigare akuta åtgärder kostat inom företaget. Dessa kostnader är svåra att uppskatta då varje turbin och situation är unik. Därför har två olika sviktkostnader tagits fram, en ”worst case” och en lägre sviktkostnad.

I tabell 13 kan kostnaderna för beräkningarna i alternativ 2 med ”worst case” sviktkostnaden ses.

5. Intäkter i beräkningarna är summan av ökad verkningsgrad och summan av hela analysperiodens nuvärdesberäknade reducerade sviktkostnader. I alternativ 2 har ingen ökning av verkningsgraden uppsakattats eftersom renovering inte innebär någon förväntad förbättring av verkningsgraden.

Intäkterna består därmed i detta fall endast av reducering av sviktkostnaden. Denna intäkt beräknas genom att summera varje års diskonterade kostnadsbesparing som en åtgärd medför. Detta beräknas genom att multiplicera kostnaden för ett haveri med skillnaden mellan referensalternativets sannolikhet för svikt med alternativ 2:s sannolikhet för svikt.

$$Intäkt_i = (p_{ref,i} - p_{ny,i}) \cdot K_{svikt}$$

$p_{ref,i}$ representerar sannolikheten för fel enligt referensalternativet, se tabell 10 respektive år och $p_{ny,i}$ representerar sannolikheten för fel efter åtgärd respektive år, se tabell 11. Med K_{svikt} menas den totala kostnaden för svikt.

exempel:

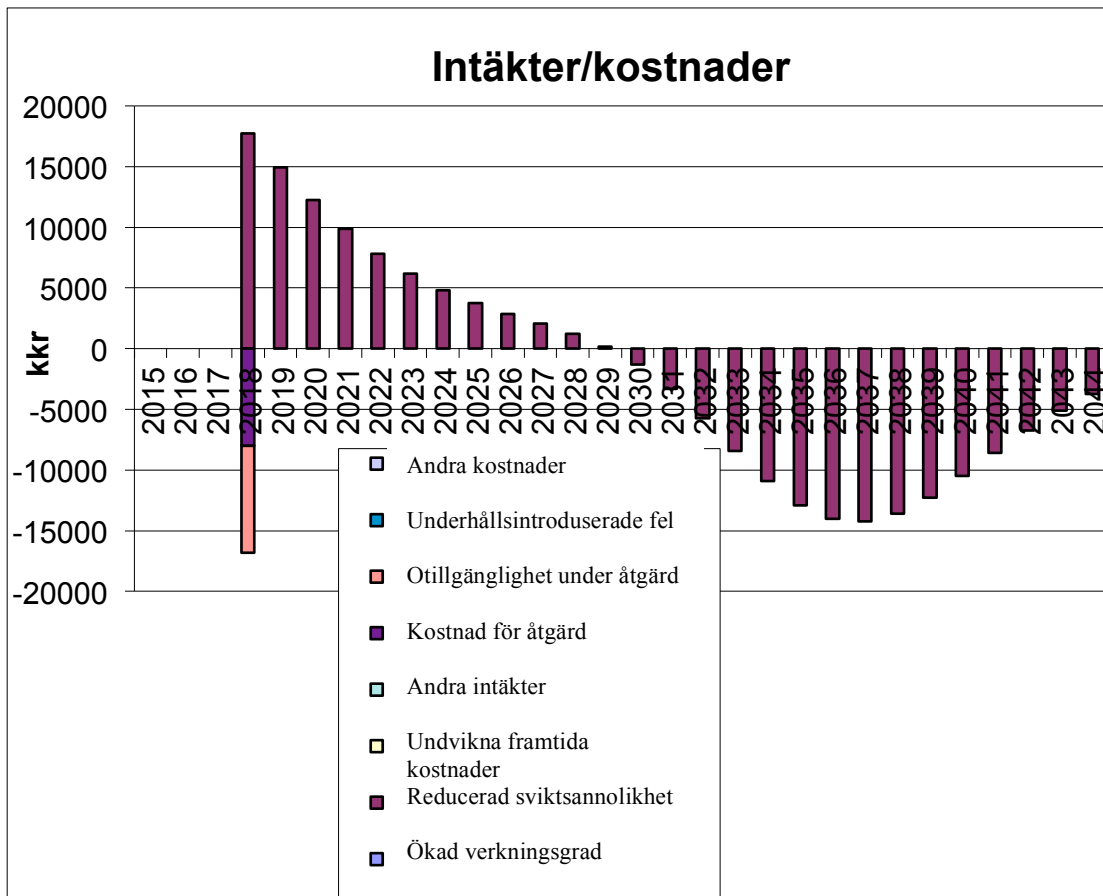
$$intäkt_{2018} = (0,122512_{2018} - 0_{2018}) \cdot 144\,891\,000 \text{ kr} \\ \approx 17\,751\,000 \text{ kr}$$

Summan av hela analysperiodens intäkter i alternativ 2 är således beräknat till 23,863 miljoner kronor, se tabell 13.

I figur 23 kan förhållandet mellan kostnader och intäkter för åtgärden renovering 2018 ses.

Tabell 9. Redovisning av nettovärde/lönsamhetsberäkning av en renovering av löphjulet 2018 alla nuvärdesberäknade intäkter med en "worst case" sviktkostnad och nuvärdesberäknade kostnader för åtgärden samt den procentuella lönsamheten.

Nuvärde av kostnader för renovering 2018:	kkkr
Resurser (material, personal)	-6 623
Otillgänglighet (produktionsbortfall)	-7 312
Summa kostnad:	-13 935
Nuvärde av intäkter med "worst case" sviktkostnad:	
Ökad verkningsgrad	-
Reducerad sviktkostnad	23 863
Summa intäkter	23 863
Nettointäkter	9 928
Procentuell lönsamhet	71,2%



Figur 23. Intäkter och kostnader som är kopplade till åtgärden (renovera löphjulet 2018). Intäkter i form av reducerad sannolikhet för sviktkostnad.

6. Lönsamheten av en åtgärd beräknas därefter genom att beräkna nettovinsten av en åtgärd, differensen mellan nuvärdet av beräknade intäkter och nuvärdet av totala kostnader för åtgärden.

$$\text{lönsamhet}_{\text{år } 0} = \text{intäkter}_{\text{år } 0} - \text{kostnader}_{\text{år } 0}$$

7. Procentuell lönsamhet beräknas genom att ta nettovinsten dividerat med kostnaderna. Resultat för alternativ 2, renovering 2018, finns att se i tabell 13.

5 Diskussion och slutsats

Vattenkraft är en bransch som har en lång historia och som skiljer sig på många sätt från andra producerande branscher då produkten konsumeras i samma stund som den produceras. Dessutom är kvaliteten på produkten svår att mäta. Aggregaten i vattenkraftverken har lång livstid, historiskt sett minst 40 år men många gånger längre än så vilket ställer enorma krav på komponenternas hållbarhet. Genom historien har olika trender inom löphjulstillverkningen funnits. Detta innebär att det finns få jämförbara exemplar av aggregat för att kunna samla felstatistik på komponenter inom ett företag. Därför skulle en gemensam databas gynna kraftbolagen på flera sätt. Dels för att kunna ställa krav på leverantörer och att möjliggöra optimering av underhållet med ett tillståndsbaserat arbetssätt. För att få en tillräcklig mängd data skulle det vara fördelaktigt om hela Norden eller kanske till och med hela Europa skulle dela denna. Detta även för att förutsättningarna på olika kraftstationer skiljer sig avsevärt och gör aggregaten än mer olika.

Olika material och design har prövats med varierande resultat genom åren men även förutsättningar för drift har förändrats. Numera frekvenskör aggregaten med fler start och stopp som följd. Finnfors G2 är ett aggregat som startas och stoppas ofta. Detta innebär att Kaplan-löphjul från 70-talet, som enligt Richard Malm är konstruerade för att följa älven och alltid vara snurrande, utsätts för påfrestningar de ursprungligen inte är byggda för. Detta tillför än större osäkerhet vid estimering av livslängder hos komponenter och behovet av tillförlitlighet av data på felstatistik blir allt mer betydande. Att tillståndsbasera varje enskilt aggregat är viktigt i och med att de körs under olika förhållanden.

Något att ha i beaktning är att de nya förutsättningarna som reglerkraft medfört innebär fler start/stopp. Därmed ligger det en osäkerhet i huruvida livslängderna kommer vara lika långa som de historiskt sett varit eller inte. De nya konstruktionerna av turbiner är smäckrare än tidigare varianter som varit mer robusta. Varje enskild turbin är en individ i sig och en del turbiner har inbyggda montage- och/eller konstruktionsfel. Även om man har historiskt data på felstatistik och livslängder ligger det en del osäkerhet i det i och med teknikens utveckling.

Under 90-talet gjordes ett försök till att skapa en gemensam databas för felstatistik inom vattenkraften utan större framgång. Dels på grund av konkurrenssituationen, brist på förståelse av nyttan och att branschen traditionellt sett har varit konservativ. Syftet med framtagandet av FRAM- och SVIKT-modellerna är att motivera kraftbolagen att börja införa tillståndsbaserat underhåll och att samla felstatistik på olika komponenter. För att göra detta är det viktigt att visa på nyttan med att använda sig av en modell där de tekniska tillstånden tas hänsyn till i de ekonomiska beräkningarna vid planering av framtida underhåll och reinvesteringar/reoveringar. Detta är ett bra sätt att sammankoppla underhållet och ekonomin. För att få med medarbetarna på tåget är det viktigt att informera om fördelarna med en sådan implementering för att sporra dem till att lägga ner det extra arbete som krävs för att

få tillgång till värdefullt data i framtiden. Dagens situation med låga kraftpriser skulle kunna vara en motivation till att implementera ett tillståndsbaserat underhåll för att kunna dra ner på kostnader av underhållet.

Finnfors kraftstation och Skellefteå Kraft har börjat sträva mot ett tillståndsbaserat arbetssätt. Man pratar om att planera översyner/inspektioner utifrån turbinens skick. Till exempel om man vid en inspektion ser att det inte skett några försämringar från förra översynen för två år sedan planeras nästa översyn in med ett längre tidsintervall. En risk som identifierats under detta arbete är att erfarenheter och viktig kunskap om aggregatens kondition och historia sitter i huvudet på folk. Ett än mer systematiserat arbetssätt där erfarenheter dokumenteras på ett enhetligt sätt skulle inte bara öka möjligheterna att planera framtiden utan även minska denna risk. Att ett tillståndsbaserat tankesätt och en positiv inställning vuxit fram samt att det finns en vision om att i framtiden ha ett tillståndsbaserat underhåll gör en implementering betydligt enklare. Om ett sådant arbetssätt önskas bör medvetenhet om nyttan av detta väl rotas i hela organisationen så att alla är med på tåget. Detta är ett gediget och hårt arbete som kommer att kräva engagemang, tålamod och resurser i form av tid, utbildning och pengar.

Innan en eventuell implementation av verktyget bör företaget sätta en nivå på sin risktolerans. I och med att många aggregat inom företaget har några år på nacken och behöver renoveras/bytas ut inom några år väntar en investeringsskuld bakom knuten. Detta påverkar självfallet Skellefteå Krafts risktolerans och bör tas hänsyn till i beräkningarna. Då åtgärder ställs mot varandra bör medvetenhet om vilken ekonomisk livstid varje enskild åtgärd har tas i beaktning. Osäkerheter vid beräkningar som utförts i detta arbete är många såsom kostnader för svikt, framtida elpriser och uppskattade livslängder hos komponenter. Vid en reinvestering/renovering är det ovisst hur lång tid som krävs för åtgärden. Detta innebär ytterligare osäkerhet. Dock har det betydelse hur väl insatt man är på området. För erfarna inom området är det enklare att förutspå sådana kostnader. Därför är det fördelaktigt att en grupp med olika bakgrunder och kompetenser sätts samman för att verktyget har ett sådant helhetsperspektiv och berör olika affärsområden. Vid upphandling garanterar leverantören ett visst antal veckors tidsåtgång och om det inte hålls får de ofta stå för vite som kan täcka en del av kostnaderna åtminstone. Skellefteå Kraft köper en helhet men är med och konstruktionsgranskar och testar för att säkerhetsställa att de håller måttet i och med att de förväntas hålla i åtminstone 40 år. En felkonstruktion kan medföra höga framtida underhållskostnader. Expertgruppen som sattes samman för att estimerar livslängder hos komponenter för detta arbete hade olika kompetenser och kompletterade varandra väl.

Resultatet av de beräkningar som genomförts i arbetet ska inte ses som någon sanning utan mer illustrera hur verktygen skulle kunna användas i framtiden tillsammans med ett tillståndsbaserat arbetssätt. Enligt beräkningar är alternativ 4 och 5 de mest ekonomiska försvarbara åtgärdsalternativen för löphjulet i fråga, se tabell 6 och 7. Resultatet tyder på att de skulle vara de bästa men osäkerhet ligger i om verktyget räknar rätt då två olika åtgärder sätts in i samma analysperiod. Motivet till att de skulle vara de bästa alternativen är att under en trettioårsperiod räcker inte en renovering som medför en förväntad medellivslängd på 20 år. Det tredje bästa alternativet enligt analysen är alternativ 2, att göra en renovering år 2018, vilket mest troligt inte håller i realiteten. Vid en analys av detta slag är det många olika faktorer som spelar in. Renovering 2018 är det som rekommenderas i detta fall utifrån beräkningar men tidsperspektivet och det faktum att hela älven samspelar spelar även in. Beroende på hur långt fram i tiden investeringar beräknas är de olika alternativ mer eller mindre försvarbara. I dagsläget är Finnfors tillsammans med en annan kraftstation flaskhalsar i Skellefteälven – det skulle vara gynnsamt med en verkningsgradsökning för företaget i stort. Om en reinvestering skulle verkställas, alternativ 3:1- 3:3, skulle detta vara möjligt genom att slimsa turbinen och därmed få ett ökat vattenflöde genom stationen.

I de ekonomiska beräkningar som gjorts i detta arbete har ingen hänsyn till inflation tagits och det av flera skäl. Huvudorsaken är att beräkningarna som utförts bygger på grova uppskattningar av såväl parametrar till sannolikhetsfördelningarna som kostnaderna av ett haveri. Dessa osäkerheter anses påverka beräkningarna i större utsträckning än inflation. De uppskattade framtida elprisernas inverkan på lönsamhetsberäkningarna har också större påverkan på resultatet än vad dagens inflation har. I takt med att modellen förfinas kan inflation vara en viktig parameter att ta hänsyn till.

Den diskonteringsränta som använts i nuvärdesberäkningarna är den företagspecifika diskonteringsränta som Skellefteå Kraft använder sig av. Det kändes naturligt att använda sig av denna diskonteringsränta även i detta arbete så att jämförelser mellan olika underhållsmodeller kan göras på ett enkelt sätt. Ett sätt att fördjupa detta arbete ytterligare kan göras genom att utföra fler känslighetsanalyser. En sådan känslighetsanalys skulle till exempel vara att variera komponenternas återstående livslängder. På så sätt kan man uppskatta hur sannolikhetsfördelningarna av fel ter sig beroende på expertgruppernas bedömningar.

I detta pilotprojekt av implementering av verktygen skulle det ultimata ha varit att kunna tillståndsbestämma de valda komponenterna innan den förväntade återstående medellivslängden bestämts. Detta har inte varit möjligt på grund av flera orsaker. För det första befinner sig Skellefteå kraft endast i startgroparna till ett tillståndsbaserat arbetssätt och därmed skulle en sådan bedömning av turbinen inte kunna genomföras i dagsläget. För det andra kan en sådan inspektion endast göras då aggregatet står stilla och tömts på vatten. En sådan inspektion/översyn har inte

gjorts under den tid detta arbete utförts. Därför har examensarbetet byggts på den erfarenhet som finns hos personalen på Skellefteå kraft och deras uppskattade återstående medellivslängder. Verktyn som har testats under examensarbetet anses som en god hjälp i framtiden för att uppnå målet med ett tillståndsbaserat arbetssätt. Med detta verktyg erhålls en värdefull helhetssyn på framtida underhållsalternativ då de ställs mot varandra i en nuvärdesberäkning. I och med en implementering av detta verktyg skulle de ekonomiska aspekterna på ett enkelt sätt kunna kopplas till de tekniska.

6 Förslag på fortsättning/uppföljning

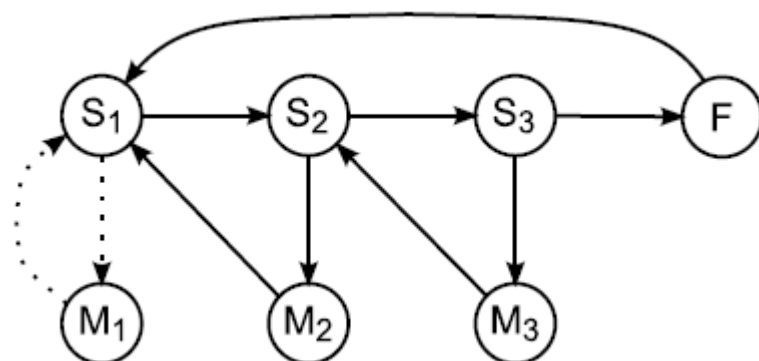
För att kunna optimera ett förebyggande underhåll bör som tidigare nämnts ett tillståndsbaserat system införas tillsammans med god dokumentation och datainsamling.

Vår intention i början av examensarbetet var att kunna ta fram en statistisk matematisk modell för optimering av riskbaserat underhåll vilket teoretisk skulle kunna göras med en Markovprocess eller med Monte Carlo-metoder. Under arbetets gång har vi insett att en sådan matematisk modell i dagsläget inte skulle kunna ge ett tillförlitligt resultat på grund av många orsaker. En betydande orsak är bristen på data/felstatistik men även att tillståndsbaserat underhåll inte ännu implementerats på Skellefteå Kraft. Utan tillräckligt dataunderlag och tillståndsbedömningar av komponenter blir en matematisk modell alltför bristfällig och därmed inte trovärdig. Därmed har den riskbaserade underhållsmodellen som tagits fram under detta examensarbete inriktas mot att undersöka eventuell lönsamhet av en reinvestering/renovering av ett nästan 40 år gammalt löphjul. Vi tillsammans med författarna till FRAM-modellen hoppas att vi med denna rapport ska kunna inspirera till införandet av tillståndsbaserad klassificering av komponenter på Skellefteå Kraft. Underhållet kan då börja styras utifrån komponenternas tillstånd. Vi förstår att det är ett gediget arbete som ligger framför men tror att det på sikt kommer att kunna effektivisera underhållet och reducera kostnader samt därmed underlätta framtidsplanering.

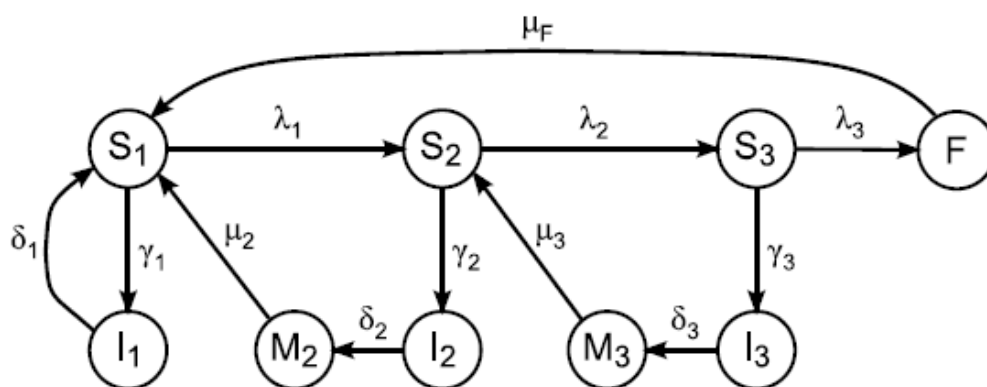
Ett framtida arbete skulle således kunna vara att ta fram en statistisk matematisk modell för optimering av underhåll. God forskning, bland annat Thomas Weltes avhandling *Deterioation and Maintenance Models for Components in Hydropower Plants* (2008) som vi tagit del av, finns på området. Den dag tillståndsbestämning av komponenter implementerats kan ett sådant arbete göras. En kort introduktion till en sådan uppgift följer här.

Att skapa en statistisk matematisk modell för optimering av underhåll är ingen lätt sak. Det är många parametrar att ta hänsyn till. Traditionellt sett har nedbrytningsprocesser, inspektion- och underhållsprocesser illustrerats med state-diagram av många författare, se figur 24 och 25. Figur 24 visar en enkel bild av ett state-diagram, S=state (tillstånd) och M=maintenance (underhåll) medan figur 25 visar ett något mer detaljerat state-diagram. I figur 25 har exempelvis I=inspections (inspektioner) lagts till tillsammans med ex, δ =decision (beslut), λ =uppehållstid mellan olika states och så vidare. För att matematiskt representera dessa state-diagram kan Markovprocesser användas vilket kan ge tillförlitliga resultat under vissa modelleringsituationer. (Welte paper 3, 2) När det gäller modellering med icke periodiska inspektioner, som avses här, ifrågasätter Welte användningen av Markovprocesser. I sin rapport, *Using State Diagrams for Modelling Maintenance of Deterioating System*, visar han att Markovprocesser inte representerar

verkligheten på ett trovärdigt sätt under premisserna med icke periodiska inspektioner. (Welte paper 3, 19)



Figur 24. State-diagram med underhåll (M) och states (S) och fel (F) . (Welte, paper 3, 5)

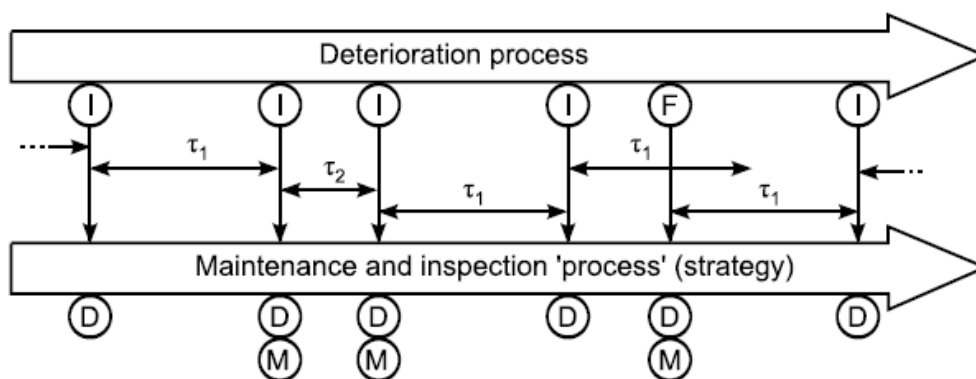


Figur 25. Utökad state-diagram med S=tillstånd, I=inspektion, M=underhåll, F=fel, δ =beslut och λ =tid. . (Welte, paper 3, 6)

Många olika matematiska modeller har varit föreslagna för att analysera nedbrytning, fel och underhåll av tekniska system samt ingenjörsmässiga strukturer. Målet är ofta att modellera inverkan av underhållsaktiviteter på operationella kostnader och tillförlitlighet för att hitta den mest optimala underhållspolicyn eller optimala inspektions – eller ersättningsfrekvensen. Kärnan i underhållsmodellering är enligt Thomas M. Welte nedbrytningsmodellen. (Welte, paper 4, 2)

Welte förespråkar att nedbrytningsprocessen och inspektion- och underhållsprocesser bör beaktas som oberoende parallella processer, se figur 26. (Welte paper 3, 6-7). Dessa två processer har kontakt med varandra då inspektioner (I) eller underhållsåtgärder (M) utförs. Vid varje inspektion samlas data och beslut (D) om eventuella åtgärder och tid till nästa inspektion tas (τ_i). Nedbrytningsprocessen är dold fram till nästa inspektion eller om fel uppstår hos

komponenten (Welte 2008, 16). Inspektioner är passiva handlingar som leder till en beslutspunkt och kan vid vissa tillfällen leda till aktiva underhållsåtgärder (Welte 2008, 17).



Figur 26. Nedbrytningsprocess parallellt med inspektions-/underhållsstrategi- process. (Welte, paper 3, 7)

Upphovsmännen till svikt har uppmärksammat bristen på insamlande av data/felstatistik inom vattenkraften i Norden och förespråkar en gemensam databas inom branschen. Liknande gemensamma databaser finns idag inom exempelvis kärnkraft- och järnvägsbranschen. Inom vattenkraften är livslängderna på utrustningen som sagt i regel lång och det finns få jämförbara turbiner inom samma företag. Därför vore det önskvärt om det fanns en databas som alla företag inom branschen kunde använda sig av för att få tillräckligt med data för att kunna få trovärdig felstatistik. Detta kräver då att alla hanterar och lagrar data på samma sätt.

Vid användandet av FRAM-verktygen synliggjordes att det är svårt att beräkna flera åtgärder under samma analysperiod. Detta ser vi som ett förbättringsområde alternativt kan informationen om hur verktygen hanterar detta bli tydligare.

Slutligen, en analys av det slag som genomförts i detta arbete skulle med fördel kunna omfatta fler komponenter och aggregat. Analys skulle kunna göras på fler stationer för att introducera arbetssättet inom företaget på ett framgångsrikt sätt.

7 Referenser

7.1 Litteratur

Coetzee, Jasper L. 2004. *Maintenance*. 8. uppl. Victoria: Trafford Publishing.

Möller, Per och Steffens, Jürgen. 2006. *Underhållsteknik*. 2.uppl. Stockholm: Liber AB.

Smith, Anthony M. och Hinchcliffe, Glenn R. 2004. *RCM: Gateway to world class maintenance*. Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann

7.2 Akademiska avhandlingar

Backlund, Fredrik. 2003. *Managing the Introduction of Reliability-Centred Maintenance, RCM: RCM as a Method of Working within Hydropower Organisations*. Diss., Luleå University of Technology.

Bengtsson, Marcus. 2007. *On Condition Based Maintenance and its Implementation in Industrial Settings*. Diss., Mälardalen University.

Stenholm, Astrid och Andersson, Dennis. 2014. *On condition-based maintenance for machine components*. Msc. Thesis, Lunds University.

Welte, Thomas. 2008. *Deterioration and Maintenance Models for Components in Hydropower Plant*. Diss., Norwegian University of Science and Technology.

7.3 Rapporter

Europastandard, 2001. Svensk version *Underhåll – Terminologi*. (EN13306)

Svensk standard, 2008. *Tillförlitlighetsverksamhet- Del 3-14, Riktlinjer- Underhåll och underhållstöd*. (SS-EN 60300-3-14).

Svensk standard, 2010. *Ledning av tillförlitlighet Del 3-11, Riktlinjer för funktionssäkerhetsinriktat underhåll*. (SS-EN 60300-3-11).

Solvang, Eivind, Welte, Thomas och Heggset, Jørn. 2011. *Svikmodell for vannkraftverk: Modellbeskrivelse og anvendelse*. Trondheim: SINTEF Energy AS.

Solvang, Eivind och Istad, Maren. 2013. *Modell för teknisk- økonomisk analyse av vedelikehold og reinvesteringer innen vannkraft*. Trondheim: SINTF Energi AS.

Welte, Thomas, Heggset, Jørn och Solvang, Eivind. 2011a. *Sviktmmodell för vannkraftverk: Skadetyper og tilstandskriterier*. Trondheim: SINTF Energi AS.

Notat.

Welte, Thomas, Heggset, Jørn och Solvang, Eivind. 2011b. *Sviktmmodell för vannkraftverk: Skadetyper og tilstandskriterier*. Trondheim: SINTF Energi AS.

Welte, Thomas, Heggset, Jørn, Eivind Solvang och Dag Eirik Nordgård. 2011. *User's Guid to Optimal Maintenance Tool Box*. Version 3. Trondheim: SINTEF Energy Research AS.

Paper 2

Welte, Thomas. 2007. *A theoretical study of the impact of different distribution classes in a Markov model*. ESREL. Stavanger, London.

Paper 3

Welte, Thomas M. a. *Using State Diagrams for Modelling Maintenance of Deterioating System*. IEEE Transactions on Power Systems

Paper 4

Welte, Thomas M. b. *Comparison of a gamma process and a state space model applied to maintenance optimization*. Norwegian University of Science and Technology.

Paper 5

Welte, Thomas M. och Eggen, Arnt O. 2008. *Estimation of sojurn time distribution parameters baset on expert opinion and condition monitoring data*. PMAPS, Rincón, Puerto Rico

7.4 Internetkällor

E.ON. *Om energi, Energikällor, vattenkraft*.

<http://www.eon.se/Om-EON/Om-energi/Energikallor/Vattenkraft/> (Hämtad 2015-05-06)

Svensk Energi. *Elfakta, Elproduktion*.

<http://www.svenskenergi.se/Elfakta/Elproduktion/> (Hämtad 2015-05-06)

Swedish smartrid. *Aktörer på elmarknaden*.

[\(http://www.swedishsmartgrid.se/aktorer-pa-elmarknaden/\)](http://www.swedishsmartgrid.se/aktorer-pa-elmarknaden/) (Hämtad 2015-05-06)

Ekonomifakta. *Energibalans i Sverige.*

<http://www.ekonomifakta.se/sv/Fakta/Energi/Energibalans-i-Sverige/Energitillforsel/>
(Hämtad 2015-05-06)

Skellefteå Kraft. *Företaget.*

<https://www.skekraft.se/om-oss/foretaget/historia/> (Hämtad 2015-04-21)

Elpriser. *Jämför.*

http://www.elpriser.se/jamfor/?userzip=90595&housing=house&domain=www.elpriser.se&powerusage=5000&campaign=on&environment=off&payment=invoice&bindtimerange=0%3A60&powertype=variable&searchccuserid=&callcenter_user_phonenr=0703145655&quicksubmit=J%C3%A4mf%C3%B6r+elpriser&page=1

(Hämtad 2015-04-21)

SEU. *Företaget.*

<http://www.seu.se/foretaget> (Hämtad 2015-03-21)

7.5 Figurer och bilder

Aguiden. *Turbiner.*

<http://aguiden.com/alingsasguiden/jonsered/turbiner.htm> (Hämtad 2015-05-07)

Weibull. *Badkarskurvan.*

<http://www.weibull.com/hotwire/issue21/hottopics21.htm> (Hämtad 2015-05-11)

Framsida. *Turbin.*

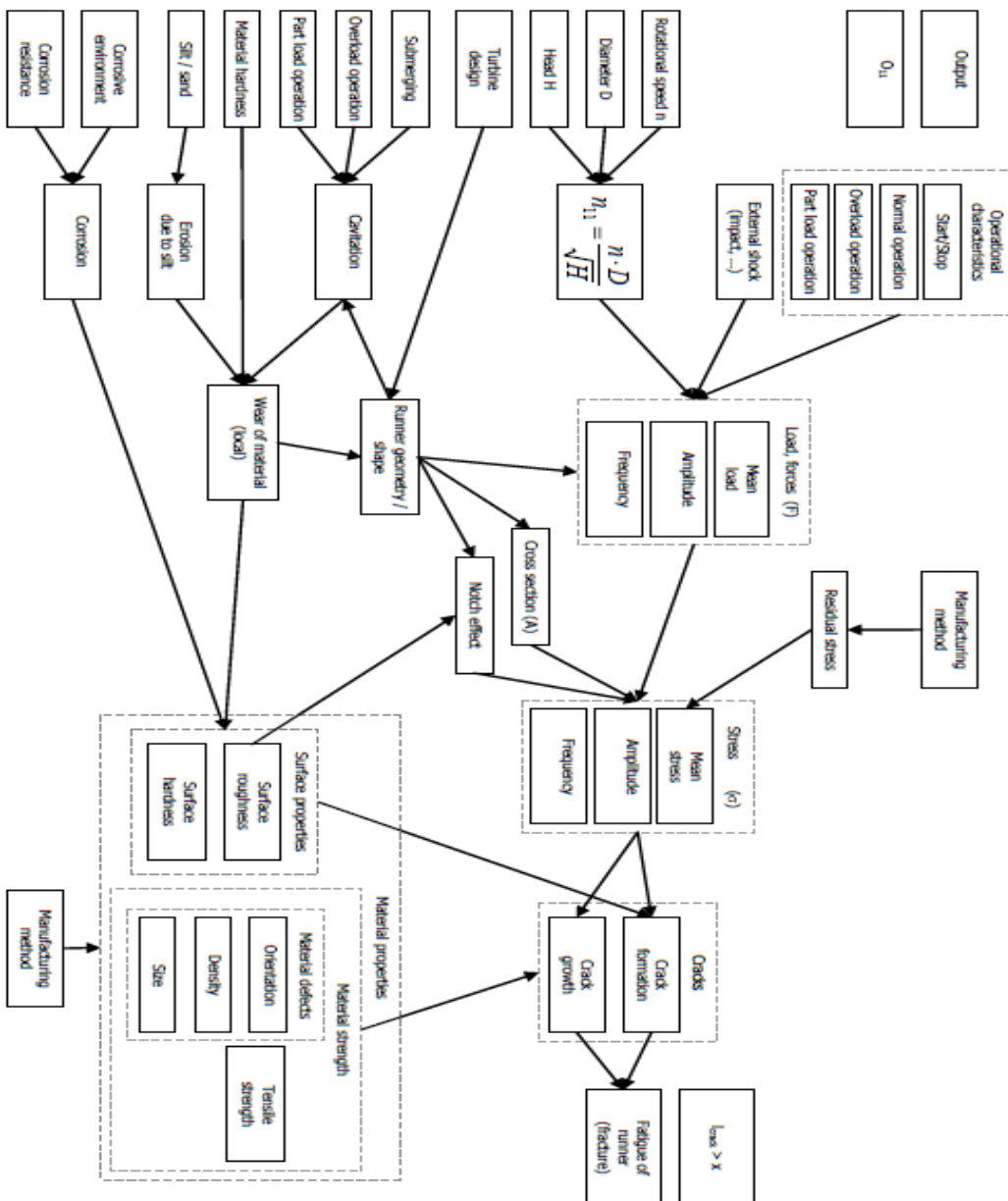
<https://www.skekraft.se/om-oss/verksamhet/vattenkraft/> (Hämtad 2015-05-25)

7.6 Intervju

Eivind, Solvang; seniorprofessor vid SINTF. 2015. Intervju 26 mars.

8 Bilagor

8.1 Bilaga 1



Figur 4.1. Influensdiagram utmattning (fatigue) som viser årsaker og parametere som påvirker skadetypen utmattning

Figur 27. Influensdiagram viser årsaker og parametere som påvirker skadetypen utmattning (Welte, Heggset og Solvang 2011, arbeidsnotat 15)

4.3 KAPLAN-, PROPELLER- OG RØRTURBINER

Dette kapittelet omhandler kun vannberørte deler/overflater av løpehjulet, dvs. skovler og utvendig nav, se ellers kapittel 4.4 Løpehjulsnav og -

4.3.1 Konstruksjonsløsninger

Tabell 4.3.1 Konstruksjonsløsninger for løpehjul (Kaplan-, propeller- og rørturbiner)

1. Skovler	2. Materialtype skovler	3. Materialtype nav
1.1 Støpt	2.1 Martensitisk rustfritt stål	3.1 Karbonstål
1.2 Støpt m/kavitasjonslist	2.2 Bronse	3.2 Bronse
	2.3 Karbonstål	
	2.4 Karbonstål med rustfri påleggssveising	

4.3.2 Skadetyper

Tabell 4.3.2 Skadetyper for løpehjul (Kaplan-, propeller- og rørturbiner)

Skadetyper	Aktuelt for følgende konstruksjonsløsninger	Kommentarer
S1 Hanning	Alle	Kalt "Slagmerker fra gjenstand som går gjennom turbinen" i håndbøkene. Tegn på skader et annet sted.
S2 Kavitasjon	Alle	Kan tyde på problemer i inntaket, vanntunneler, ...
S3 Korrosjon	Kun 2.3, 2.4 og 3.1	Hovedsakelig for skovler, men nav kan også være utsatt
S4 Sanderosjon	Alle	
S6 Umåling/ sprekker	Alle	Kun skovler
S8 Rivning	Alle	Gjelder yterperiferi mot løpehjulskammer, se kapittel 12. Kun nevnt i håndbøkene som skadetype på løpehjulskammer. Skyldes vanligvis feil i andre komponenter, se eksempler i tabell 4.3.2

8.2 Bilaga 2

Figur 28. Eksempel från sviktmodellen på definition av skadetyper på Kaplanløphjul (Welte, Heggset och Solvang 2011, arbeidsnotat 20)

4.3.3 Kriterier for tilstandsfastleggning

Tabell 4.3.3 Kriterier for tilstandsfastleggning for løpehjul (Kaplan-, propeller- og rørturbiner)

Skadetyper	Karakter 2	Karakter 3	Karakter 4	Karakter 5	Kommentarer
S1 Hamning	"Malt" overflate på mindre partier på skovler eller nav	Groper. Ru overflate.	Kritiske sprekker/fell i skovler eller nav	Brudd	Kan føre til umattingssprekker.
S2 Kavitasjon	Mindre partier av skovlene har en malt overflate ("frosting")	Øvre grense til karakter 3 tilsvare IEC 80809-1, øvre grense	Øvre grense til karakter 4 tilsvare 2 x IEC 80809-1, øvre grense	Brudd/lekkasje fra nav. Skader over karakter 4, dvs. over 2 x IEC 80809-1, øvre grense.	Forslag er å ta utgangspunkt i IEC 80809-1 for å kvantifisere skadeomfang karaktersette skaden. Kan føre til umattingssprekker.
S3 Korrosjon	Avskallet maling/flate Malte overflater bedre enn rustgrad R12 iht. ISO 4628-3 [5].	Malte overflater bedre enn rustgrad R13 iht. ISO 4628-3 [5].	Betydelige tæring	Brudd eller lekkasje	Kan føre til umattingssprekker.
S4 Sanderosjon	Let erosion av mindre partier av skovlene. Delvis bortslitt maling på nav.	Tegn til bølger i overflaten	Omfattende bølger med vesentlig reduksjon av materialtykkelsen samt geometriendringer	Skovlbrudd	Skader pga sanderosjon kan ut IEC 80204 er en standard unde kan bli aktuell for å bedømme sanderosjonsskader.
S5 Utmattning / sprekker	Tegn til sprekkeindikasjoner	Sprekkeindikasjoner og mindre sprekker som bedømmes ufarlig/ikke kritisk (faglig bedømming som er basert på en bruddmekanisk vurdering utføres)	Kritiske sprekker i løpehjulskovlene. EBL 417-2000 gir kriterier for overgang fra karakter 3 til 4	Skovlbrudd	EBL-publikasjon nr. 417-2000 N destruktiv prøving av turbinløpe (NDT Brukemanual - Løpehjul rørturbiner), side 7, gir akseptkr "kritiske" sprekkestørrelser. I dette notatet stilles mellom krit kritiske sprekker/sprekkeindikasj en presisering i forhold til håndt alle sprekker gir karakter 4.
S6 Rivning	Antydning til rivning på et begrenset område av kammeret.	Rivninger på større deler av omkretsen med materialavvikling i kammer og grad på skovl.	Betydelige rivninger på mesteparten eller hele omkretsen. Signifikant materialavvikling.	Havari i form av fastkjøring.	Kan f.eks. skyldes silasje av or løpehjulskovler, ikke-sentrert lø løpehjulskammer, fell aksial pc løpehjulet og/eller fremmedlegge kammer og løpehjulskovler.

Figur 29. Eksempel från sviktmodellen på kriterier for tillstandsbedömning av Kaplanløphjul (Welte, Heggset och Solvang 2011, arbeidsnotat 21)

4.4 LØPEHJULSNAV OG -MEKANISME (Kaplan- og rørrubin)

Følgende er inkludert:

- Servomekanisme i løpehjulsnav inklusive opplagring av løpehjulsskivler
- Tilbakeføringsmekanisme eksklusiv oljeinnføringsenhet på toppen/enden av generatoraksel
- Tetninger mot vannvei

Alle deler forutsetter demontasje for å utføre visuell inspeksjon.

4.4.1 Konstruksjonsløsninger

Tabell 4.4.1 Konstruksjonsløsninger for løpehjulsnav og mekanisme

1 Type nav	2 Skovtleining	3 Opplagring av skovtapp	4 Type lagar
1.1 Oljefyll	2.1 O-ring i trekanspor	3.1 to opplagere (disc type)	4.1 Bronselemessing (gjelder 1.1)
1.2 Oljefritt	2.2 Chevron type	3.2 tre opplagere	4.2 Seivsmørende (gjelder både for 1.1 og 1.2)
	2.3 Type Solosele e.l.		

4.4.2 Skadetyper

Tabell 4.4.2 Skadetyper for løpehjulsnav og mekanisme

Skadetyper	Aktuelt for følgende konstruksjonsløsninger	Kommentarer
S1 Oljlekkasje	1.1	Lekkasje skyldes vanligvis siltasje på tetninger. Lekkasje vil derfor være et mål på siltasjen.
S2 Mekanisk siltasje	Alle.	Primært siltasje av lagar.
S3 Utmattning	Alle. Høyt belastede deler av servomekanisme samt oljeinnføringsrør kan være utsatt.	
S4 Vann i olje	1.1	
S5 Korrosjon	Usannsynlig pga. miljø (olje) eller korrosjonsbestandige materialer bortsett fra vannlekkasje inn i nav – type 1.1	
S6 Løse forhindelser		Små skruer som løsner kan føre til store konsekvenser/havari.

Figur 30. Eksempel från sviktmodellen på definition av skadetyper på Kaplanlöphjul (Welte, Heggset och Solvang 2011, arbetsnotat 22)

4.4.3 Kriterier for tilstandsfastlegging

Tabell 4.4.3 Kriterier for tilstandsfastlegging for løpehjulsnar og mekanisme

Skadetyper	Karakter 2	Karakter 3	Karakter 4	Karakter 5	Kommentarer
S1 Oljlekkasje		Mindre oljlekkasjer ved skovletting.	Betydelige avvik/forandringer med fare for nedsett smøreeffekt, følgeskader og mulig forurensning. Støre oljlekkasjer ved skovlettinger.	Olje i nav tørt i vannvei. F. eks. pga. at løpehjulskonus faller av.	Gjelder nav type 1.1. Håndbøkene gir ikke absolute ver karakterisering. Systematisk oljeregnskap anbefalt oppdage avvik/forandringer.
S2 Mekanisk slitasje		Økt friksjon i lager.	Regulering ikke mulig pga. økt friksjon.	Brudd/kritisk feil i komponenter. Aggregatet må stoppes.	Tilstanden oppdages vanligvis ikke er kritisk eller feil oppstår. Dette si aktuelle komponenter ikke er tilgje inspeksjon. Økt friksjon kan avdekkes ved mål hystere for servomotor (servoinn tilstanden oppdages vanligvis ikke er kritisk eller feil oppstår. Dette si aktuelle komponenter ikke er tilgje inspeksjon.
S3 Urnating				Brudd/kritisk feil i komponenter. Aggregatet må stoppes.	Tilstanden oppdages vanligvis ikke er kritisk eller feil oppstår. Dette si aktuelle komponenter ikke er tilgje inspeksjon.
S4 Vann i olje					Lite sannsynlig siden oljetrykk i na enn statisk vanntrykk i vannvei (va Usannsynlig pga. miljø (olje) eller korrosjonsbestandige materialer b vannlekkasje i nav – type 1.1
S6 Korrosjon					Tilstandsbeskrivelser kan også byc andre skadetyper. Økt friksjon kan avdekkes ved mål hystere for servomotor (servoinn
S8 Løse forbindelser		Økt friksjon.	Regulering ikke mulig pga. økt friksjon.	Brudd/kritisk feil i komponenter. Aggregatet må stoppes.	

Håndbok Kaplanturbin beskriver ulike målinger som kan gjennomføres:

- Måling av oljlekkasje
- Oljeanalyse
- Kontroll av skov/vinkel/vinsing
- Kontroll av forstyring mot tilbakeføring
- Måling av klaringen i foringene

Håndboka gir kriterier for karakterisering for disse målingene. Avhengig av måleresultatene kan dette tyde på ulike skadetyper.

Figur 31. Eksempel från sviktmodellen på kriterier for tillstandsbedömning av löphjulsnav och mekanism (Welte, Heggset och Solvang 2011, arbetsnotat 23)

8.3 Bilaga 3

Col. A: ID (designation of an individual item, should be unique) [string]
 Col. B: Description of item, failure mechanism, ... [string]
 Col. C: Date of commissioning [date]
 Col. D: Technical condition (state) at commissioning [1, 2, 3,
 Col. E: Date of first inspection [date]
 Col. F: State at first inspection [1, 2, 3, 4, 5]
 Col. G, H, I, etc.: Dates and states of other inspections (in chronologic order)

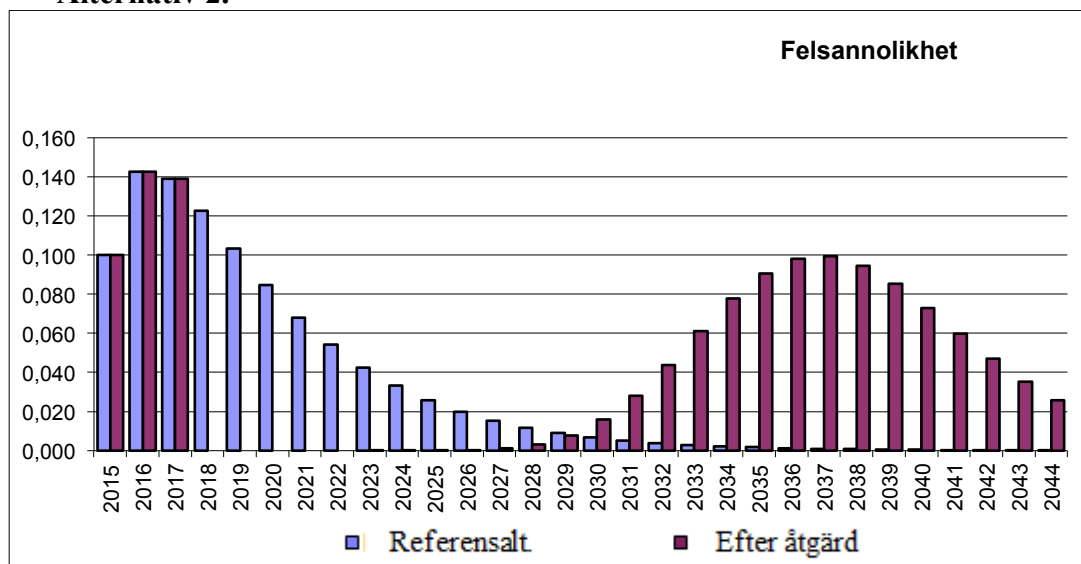
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	
1	1	Example equipment	1985-03-12	1	1989-10-19	1	1993-05-31	1	1996-01-25	1	1998-07-01	2	2000-01-05	3	2001-01-12	4	2001-10-06	5					
2	2	Example equipment	1985-03-12	1	1989-09-12	1	1992-09-02	1	1995-09-14	1	1999-01-11	3	2000-04-17	4	2000-07-22	5							
3	3	Example equipment	1985-03-12	1	1987-07-24	1	1991-08-28	1	1993-11-29	1	1997-06-07	1	1999-05-28	1	2002-10-05	1	2006-05-04	1	2010-02-12	1			
4	4	Example equipment	1985-03-12	1	1988-06-09	1	1991-10-17	1	1993-12-26	1	1996-12-11	1	1999-01-14	1	2002-06-10	1	2005-06-29	1	2009-02-04	1			
5	5	Example equipment	1985-03-12	1	1987-11-16	1	1991-03-26	1	1993-08-18	1	1996-10-23	1	2000-02-10	4	2000-12-20	5							
6	6	Example equipment	1985-03-12	1	1988-04-04	1	1991-05-23	1	1994-09-05	1	1996-08-11	1	1999-10-14	1	2002-12-08	3	2003-10-27	4	2004-07-29	5			
7	7	Example equipment	1985-03-12	1	1986-10-21	1	1989-06-18	1	1993-06-22	1	1996-09-08	1	1999-05-11	1	2002-02-21	1	2005-09-16	1	2009-09-15	4	2010-06-23	5	
8	8	Example equipment	1985-03-12	1	1987-08-30	1	1989-12-18	1	1993-05-31	1	1995-10-14	1	1999-06-05	1	2001-08-20	1	2004-12-15	1	2007-01-30	1	2009-05-26	1	
9	9	Example equipment	1985-03-12	1	1988-02-20	1	1990-12-09	1	1993-06-20	1	1995-10-29	1	1998-10-21	2	2001-01-06	5							
10	10	Example equipment	1985-03-12	1	1988-04-08	1	1991-01-10	1	1994-02-15	1	1997-07-25	1	2001-03-25	1	2006-05-01	1	2009-10-06	1					
11																							
12																							
31																							
32																							
33																							
34																							
35																							

!!! Name of worksheet must be "Data" !!!

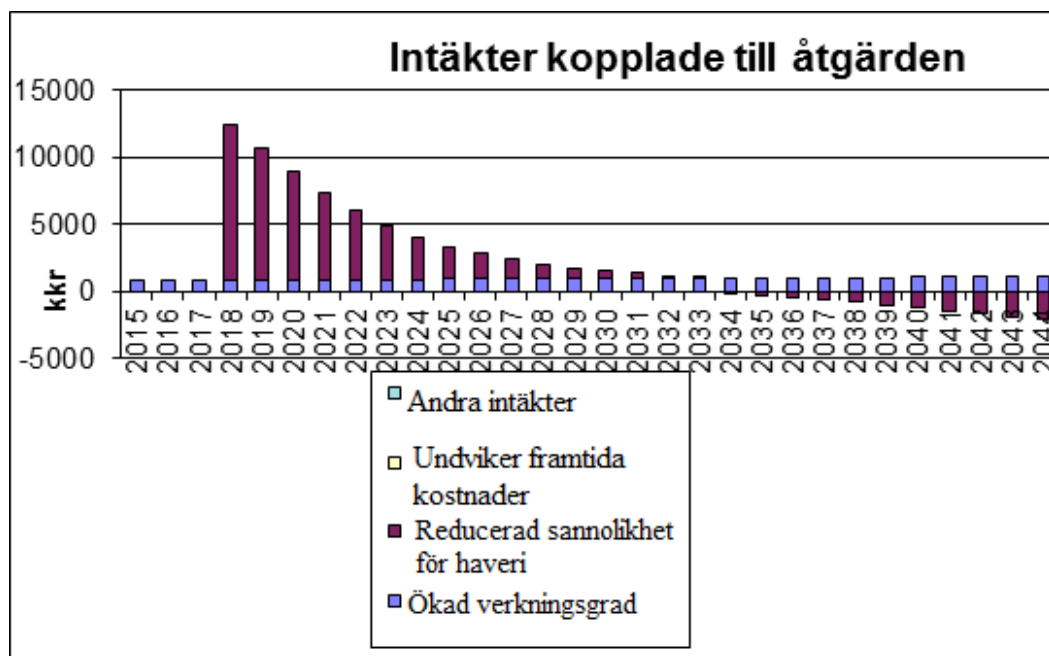
Figur 32. Förslag på utformning av framtida databas (tillståndsbaserad).

8.4 Bilaga 4. Alternativ 2 till 5 med låg SVIKT-kostnad

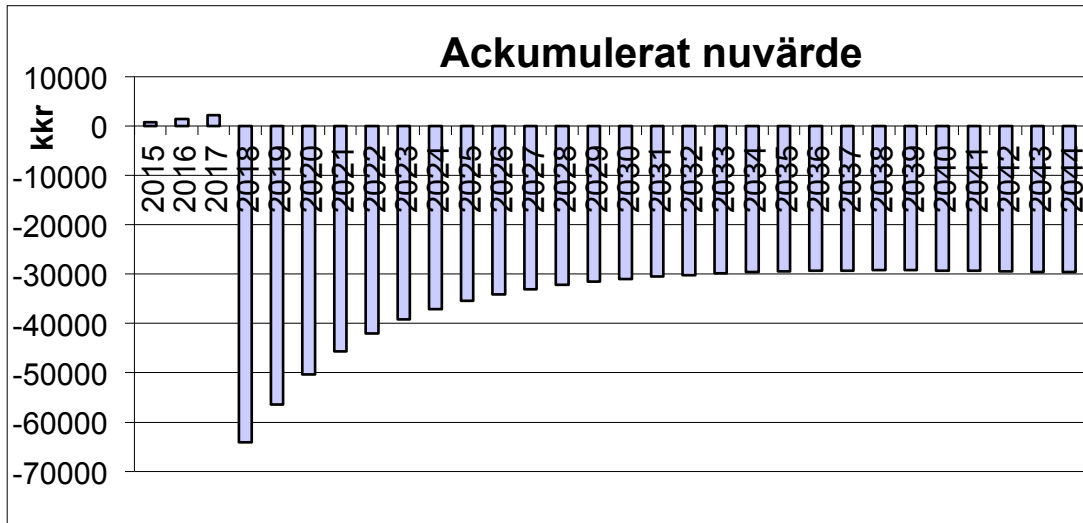
8.4.1 Åtgärd: renovera löphjul 2018 med MRL = 20 och 10-percentil = 15. Alternativ 2.



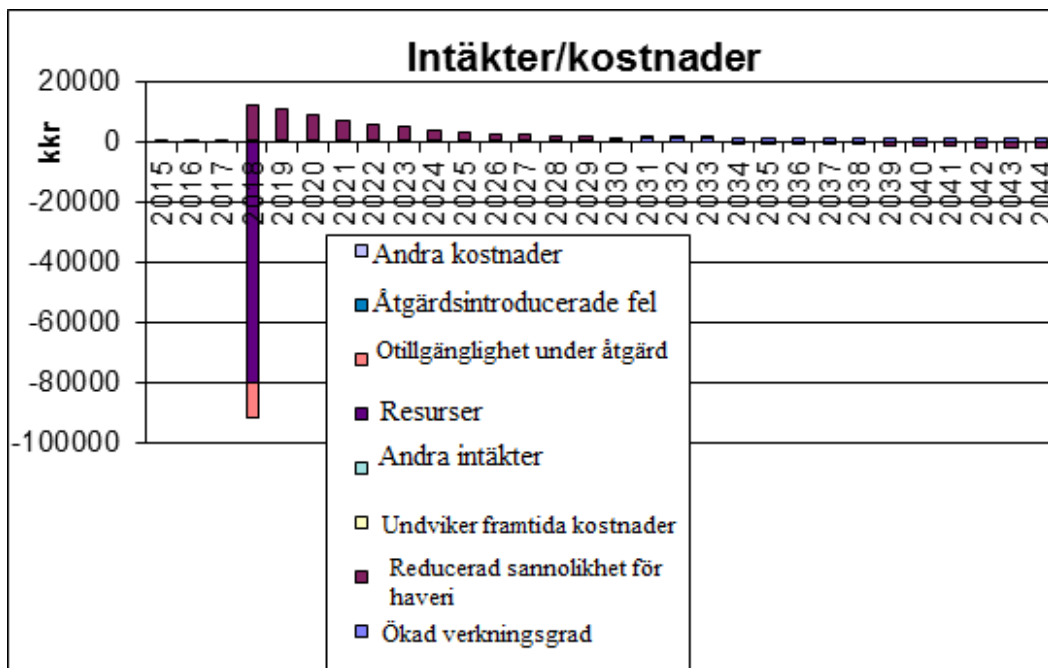
Figur 33. Sannolikhet för fel/haveri under perioden 2015-2044 vid referensalternativet med MRL=5, 10-percentil=1, och efter utförd åtgärd (renovering löphjul 2018) med MRL=20 och 10-percentil=15.



Figur 34. Intäkter som är kopplade till åtgärden; renovera löphjul 2018.

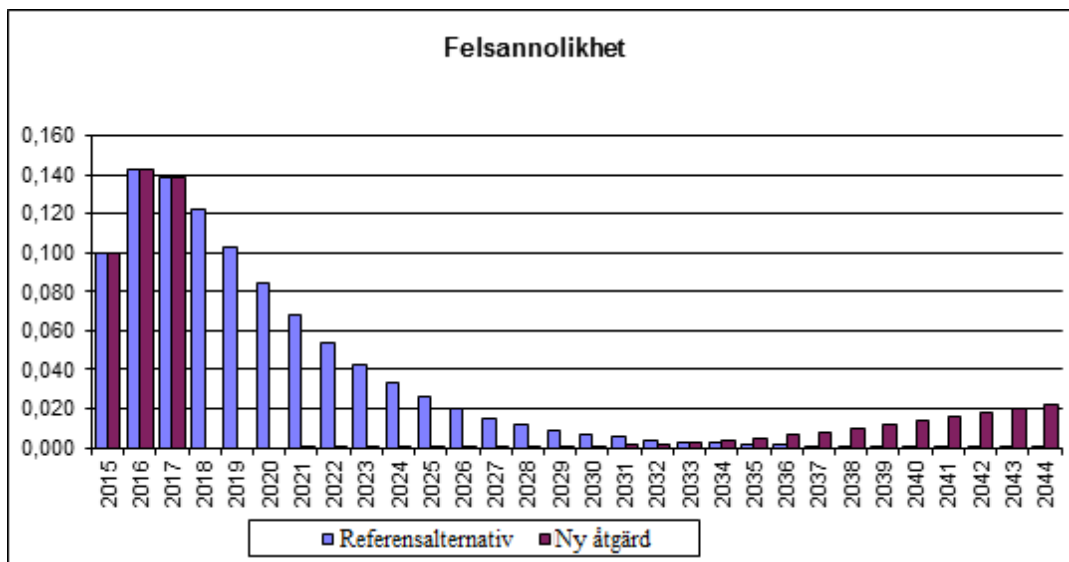


Figur 35. Ackumulerat nuvärde.

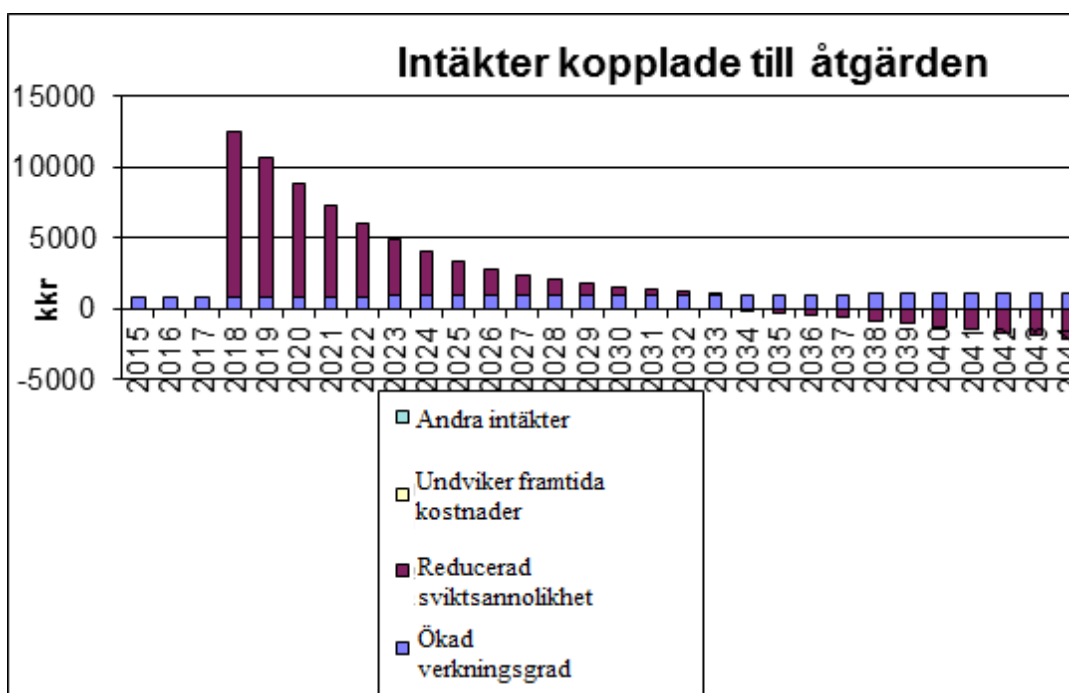


Figur 36. Intäkter/kostnader som är kopplade till åtgärden; renovera löphjul 2018.

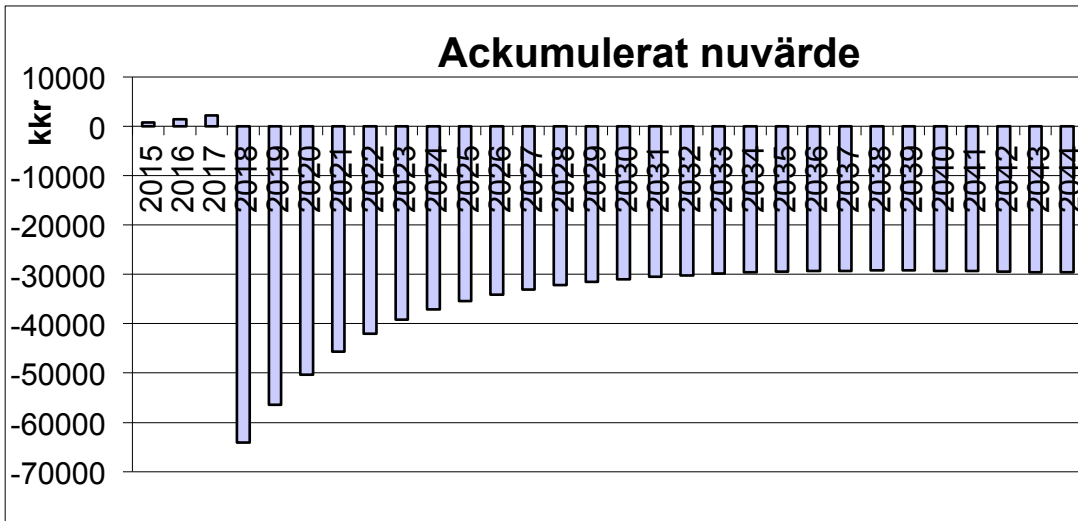
8.4.2 Åtgärd: reinvestera löphjul 2018 med MRL=40 och 10-percentil=25.
Alternativ 3:1.



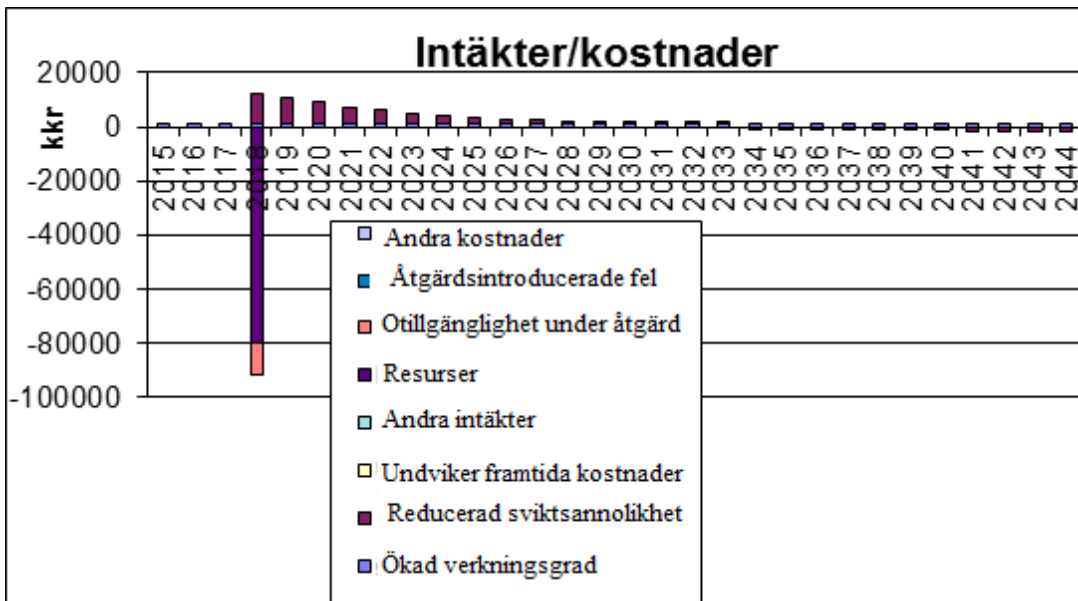
Figur 38. Sviktsannolikhet under perioden 2015-2044 för referensalternativ och för åtgärdsalternativet (reinvestera nytt löphjul 2018) med MRL=40, 10-percentil=25.



Figur 39. Intäkter som är kopplade till åtgärden, reinvestering av löphjul.



Figur 40. Ackumulerat nuvärde.

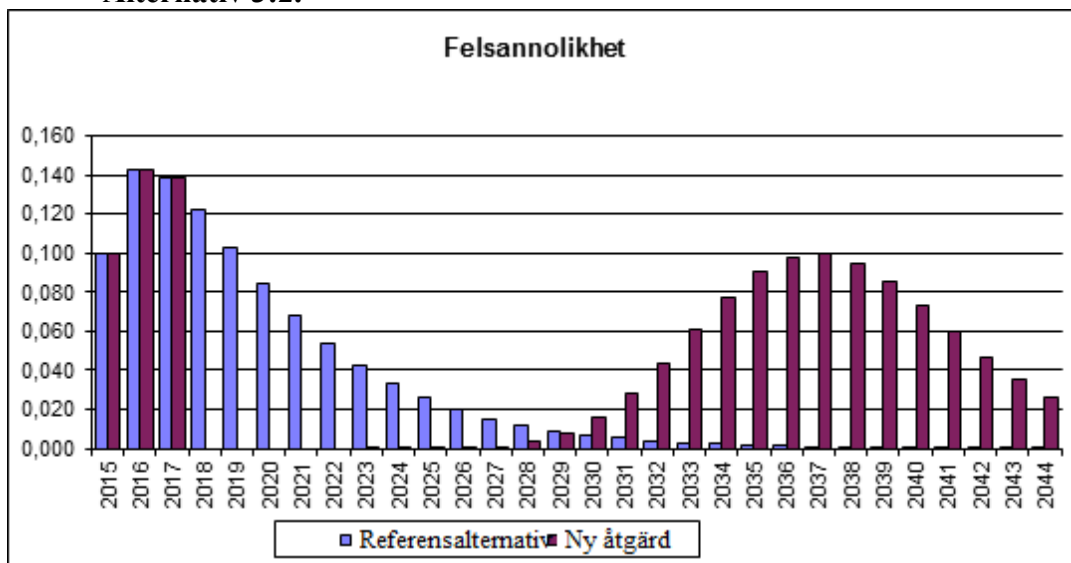


Figur 41. Intäkter/kostnader som är kopplade till åtgärden; reinvestering av löphjul 2018.

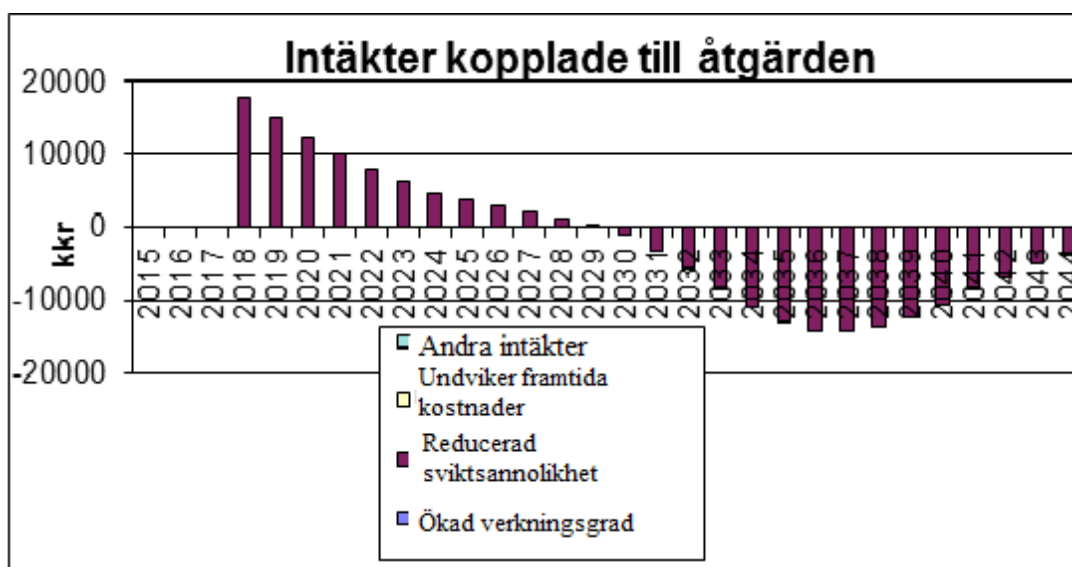
	Nuvärde																														
	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042	2043		
Intäkter																															
Ökad verkningsgrad	11579	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
Reducerad sviktsannolikhet	34870	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
Undviker framtida kostnader	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
Andra intäkter	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
Summa	46100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
Kostnader																															
Resurser	53670	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
Ortlänglighet under åtgärden	4794	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
Åtgärdsintroducerade fel	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
Andra kostnader	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
Summa	58464	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
Resultat	-2232	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
Ackumulerat nuvärde		751	1452	2139	24139	33322	40336	45811	49991	53199	55762	57836	59490	60747	61720	62456	62997	63347	63601	63779	63891	63945	63946	63873	63731	63529	63278	62988	62667	62319	61964
Diskonteringsränta	65%																														
Nettonuvärde per budgetkorna	-2,5%																														

Figur 42. Sammanställning resultat reinvestering löphjul, MRL=40 och 10-percentil=25. Lägre svikt-kostnad antas i detta fall.

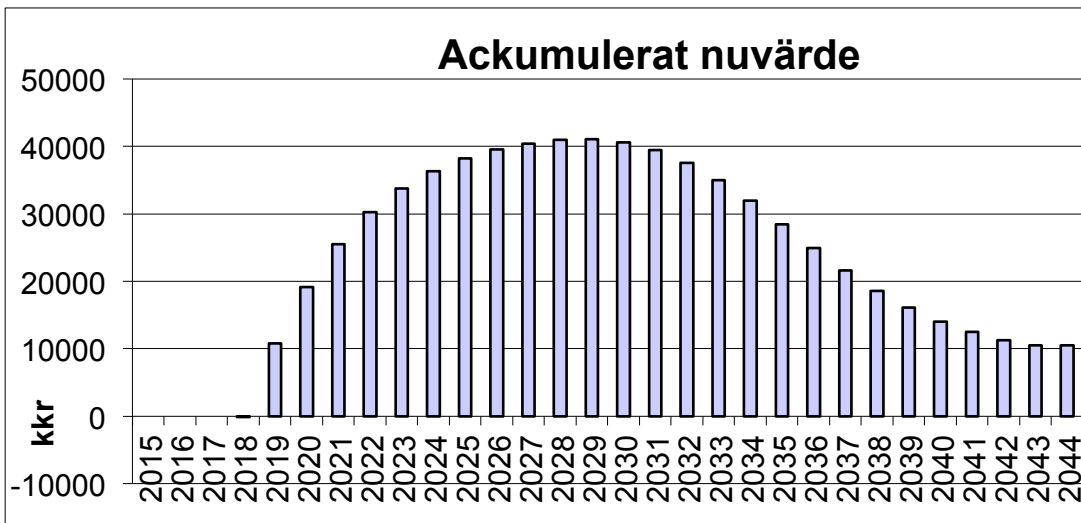
8.4.3 Åtgärd: reinvestera löphjul 2018 med MRL = 40 och 10-percentil = 30. Alternativ 3:2.



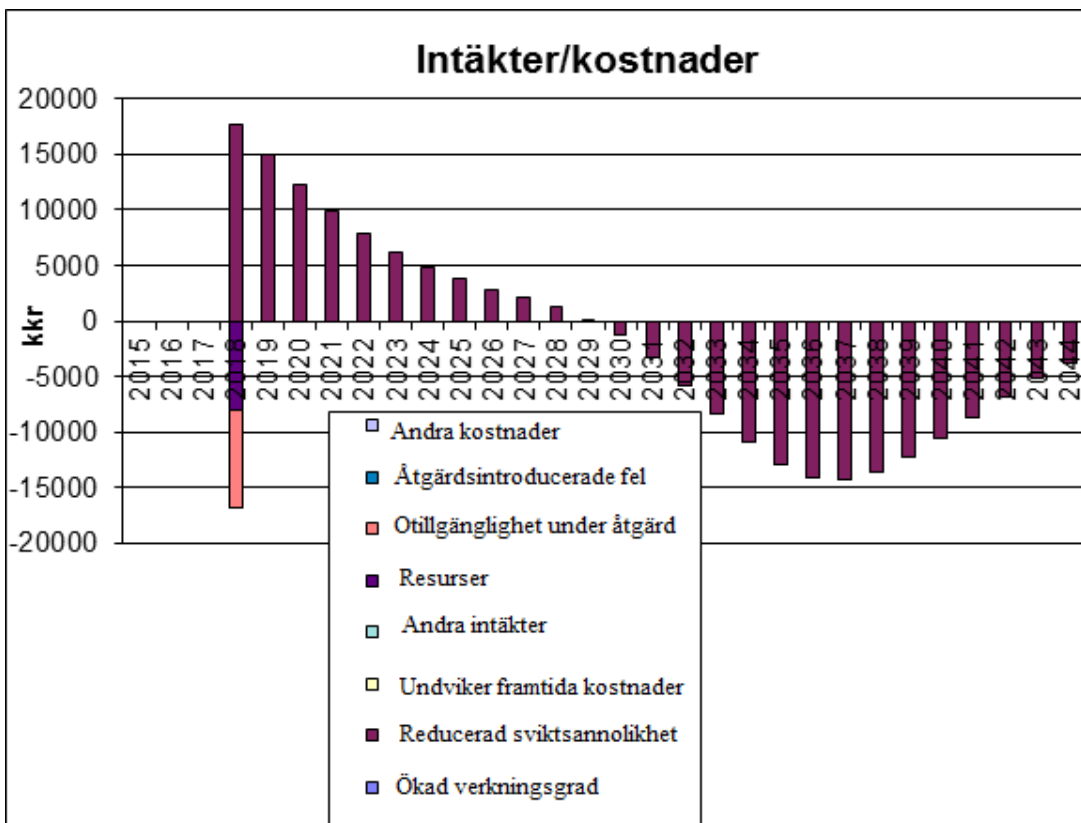
Figur 43. Sviktsannolikhet under perioden 2015-2044 för referensalternativ och för åtgärdsalternativ (reinvestera nytt löphjul 2018) med tillhörande MRL=40, 10-percentil=30.



Figur 44. Intäkter som är kopplade till åtgärden; reinvestering av nytt löphjul 2018.



Figur 45. Ackumulerat nuvärde.

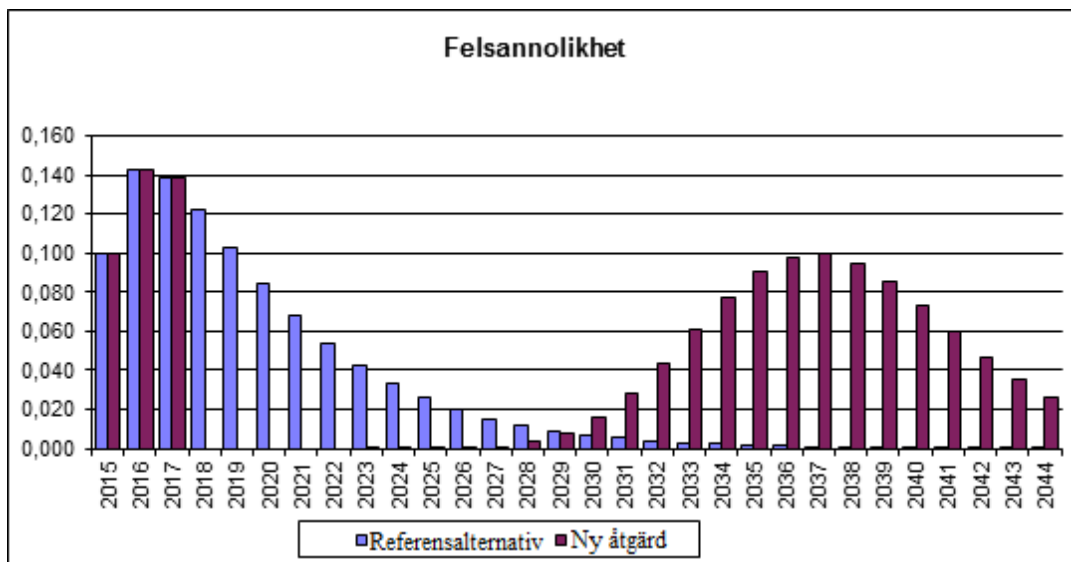


Figur 46. Intäkter/kostnader som är kopplade till åtgärden; reinvestering av löphjul 2018.

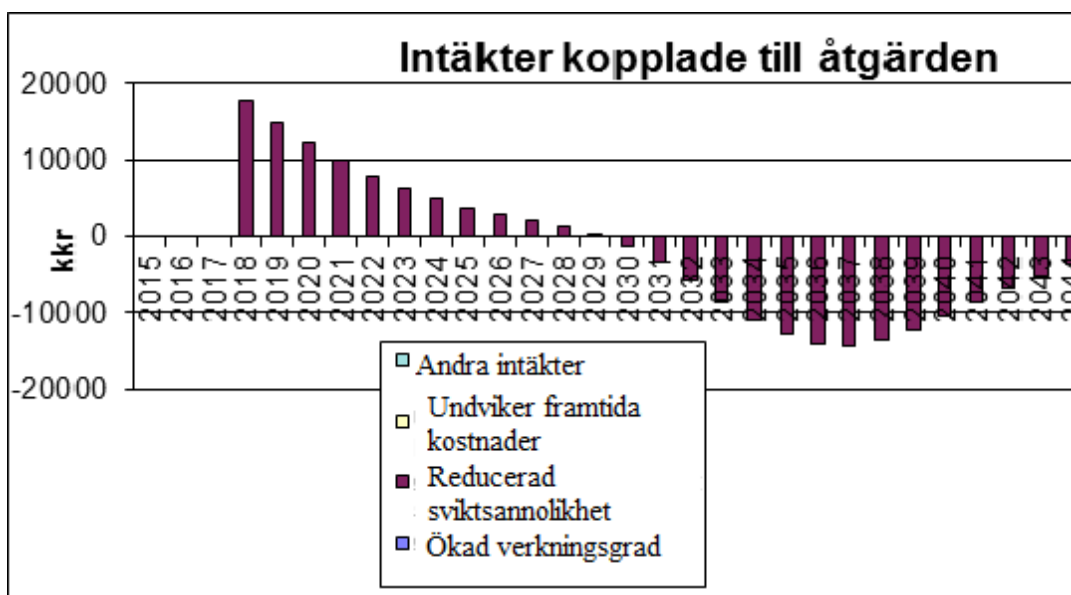
	Nuvärde																														
	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042	2043	2044	
Intäkter																															
Ökad verkningsgrad	14579	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Reducerad sviktsannolikhet	36630	0	0	0	11625	9794	8027	6461	5333	4440	3755	2949	1993	1456	1117	854	651	435	375	282	208	145	88	27	44	-135	-355	-411	-510	-656	-115
Undvikter framtida kostnader	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Andra intäkter	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Summa	42208	0	0	0	11625	9794	8027	6461	5333	4440	3755	2949	1993	1456	1117	854	651	435	375	282	208	145	88	27	44	-135	-355	-411	-510	-656	-115
Kostnader																															
Resurser	-59678	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Otillgänglighet under åtgärden	-3794	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Åtgärdsintroducerade fel	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Andra kostnader	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Summa	-63471	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Resultat	-21263	0	0	0	11625	9794	8027	6461	5333	4440	3755	2949	1993	1456	1117	854	651	435	375	282	208	145	88	27	44	-135	-355	-411	-510	-656	-115
Akkumulerat nuvärde		751	1463	2739	54139	56302	50305	49501	41991	39199	37051	35394	34075	33035	32795	31807	30831	30439	30113	29839	29595	29407	29279	29199	29166	29144	27954	27794	27765	27733	2773
Diskonteringsränta		6,5%																													
Nettonuvärde per busedekorna		-29,5%																													

Figur 47. Sammanställning resultat reinvestering löphjul, MRL=40 och 10-percentil=30. Den lägre förväntade svikt-kostnaden antas.

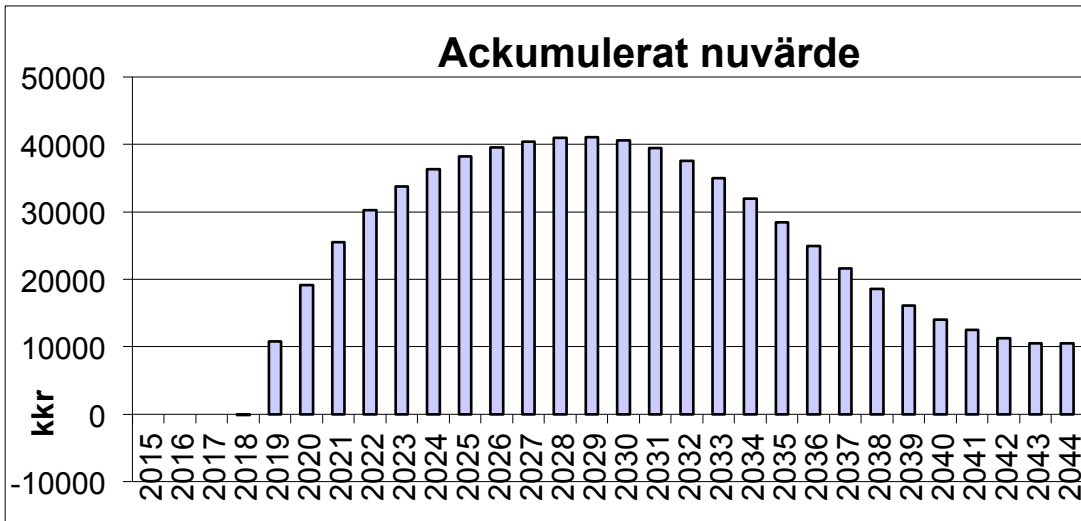
8.4.4 Åtgärd: reinvestering av löphjul 2018 med MRL=40 och 10-percentil=34,90. Alternativ 3:3.



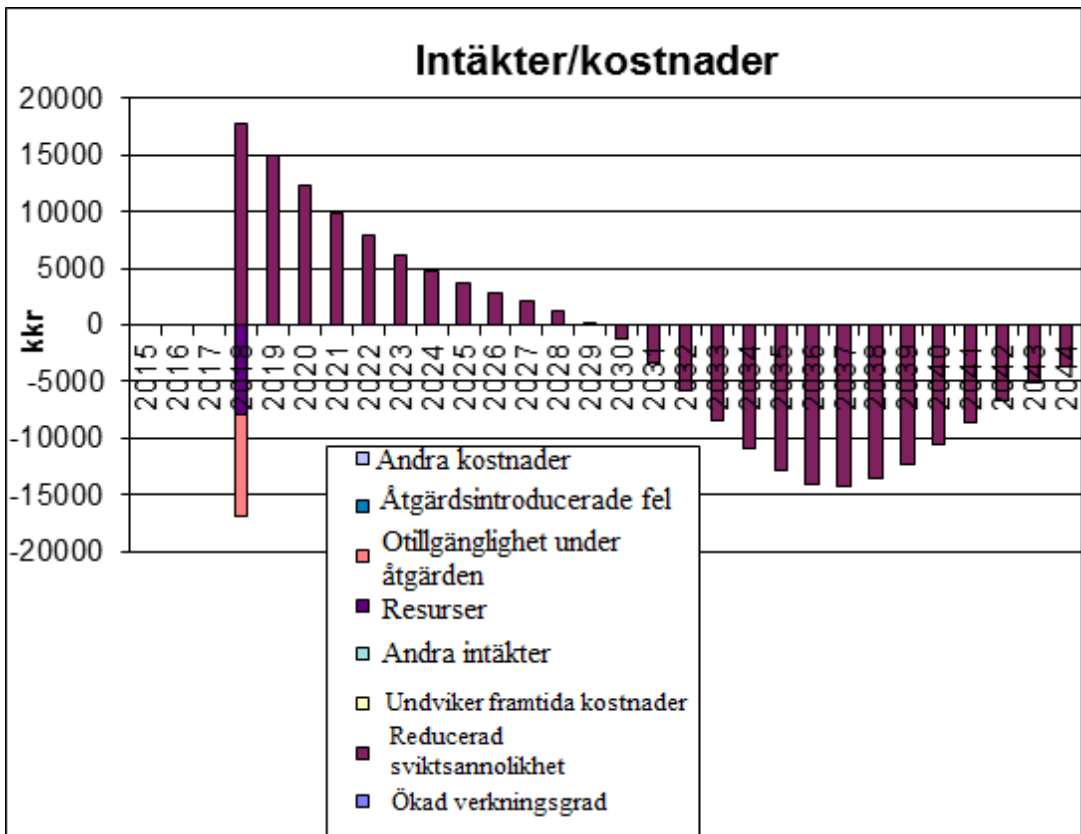
Figur 48. Sviktsannolikhet under perioden 2015-2044 för referensalternativet och för åtgärdsalternativet(reinvestera nytt löphjul 2018 med MRL=40 och 10-percentil=34,90).



Figur 49. Intäkter som är kopplade till åtgärden; reinvestering av nytt löphjul 2018.



Figur 50. Ackumulerat nuvärde.

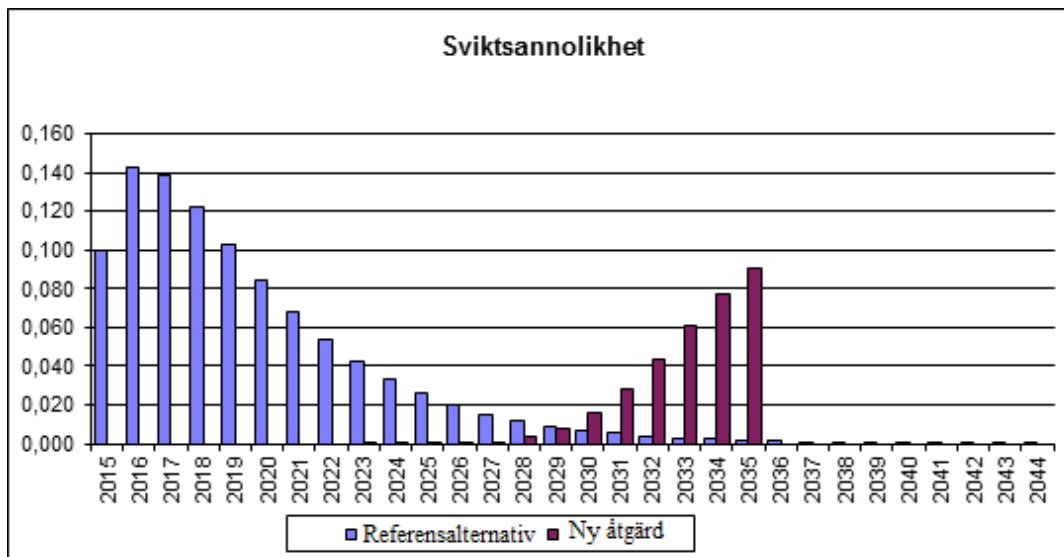


Figur 51. Intäkter/kostnader som är kopplade till åtgärden; reinvestering av löphjul 2018.

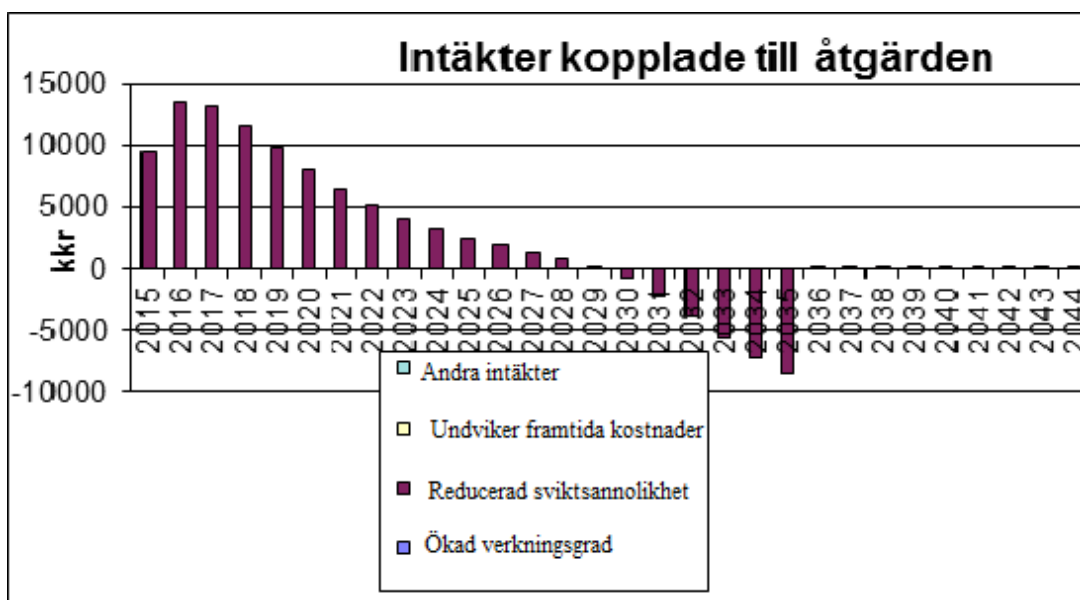
	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	
Intäkter																											
Ökad verkningsgrad	16379	800	808	824	832	841	849	857	866	875	883	892	901	910	919	929	938	947	957	966	976	986	996	1005	1015	1025	
Reducerad sviktsannolikhet	32287	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Undvikter framtida kostnader	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Andra intäkter	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Summa	40666	800	808	824	832	841	849	857	866	875	883	892	901	910	919	929	938	947	957	966	976	986	996	1005	1015	1025	
Kostnader																											
Resurser	-39678	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Otillgänglighet under åtgärden	-8764	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Åtgärdsintroducerade fel	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Andra kostnader	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Summa	-8041	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Resultat	-19575	800	808	824	832	841	849	857	866	875	883	892	901	910	919	929	938	947	957	966	976	986	996	1005	1015	1025	
Akkumulerat nuvärde		751	1463	2139	24138	35882	50035	65811	84981	10791	13919	17851	23584	30475	38835	47997	58439	70113	83037	97402	113598	131827	151495	172828	196085	221799	
Diskonteringsränta	65%																										
Nettonvärde per budgetkorna	-20,6%																										

Figur 52. Sammanställning resultat reinvestering av löphjul, MRL=40 och 10-percentil=34,90. Den lägre svikt-kostnaden antas.

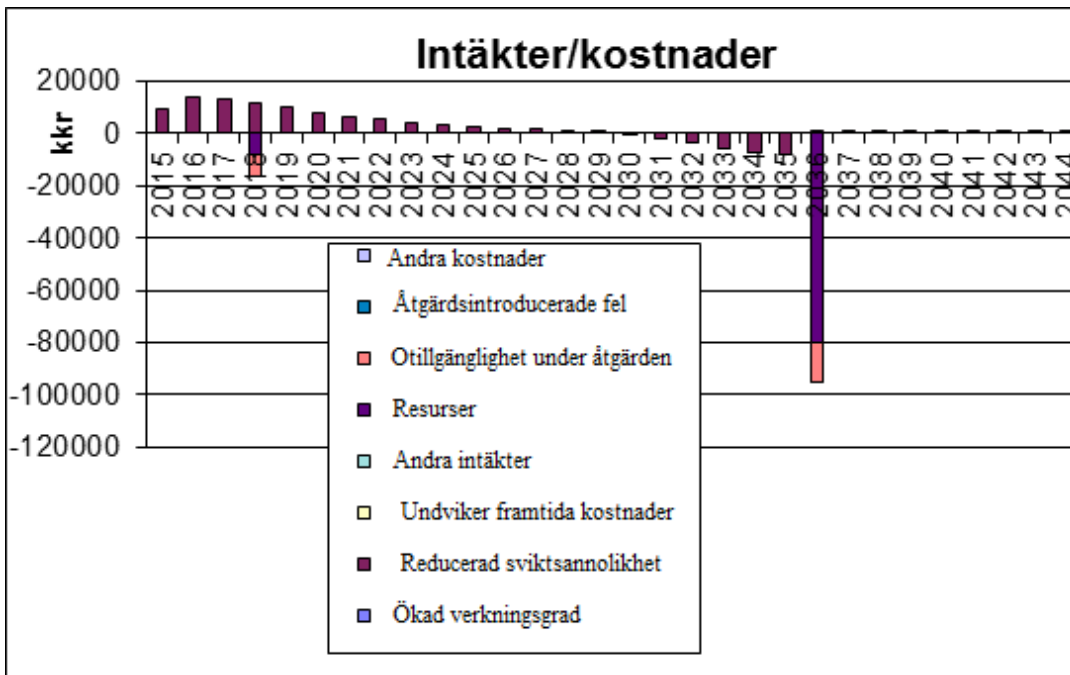
8.4.5 Åtgärd: Renovera löphjul 2018 med MRL=20 och 10-percentil=15 och reinvestering av nytt löphjul 2036 med MRL=40 och 10-percentil=34,90. Alternativ 4.



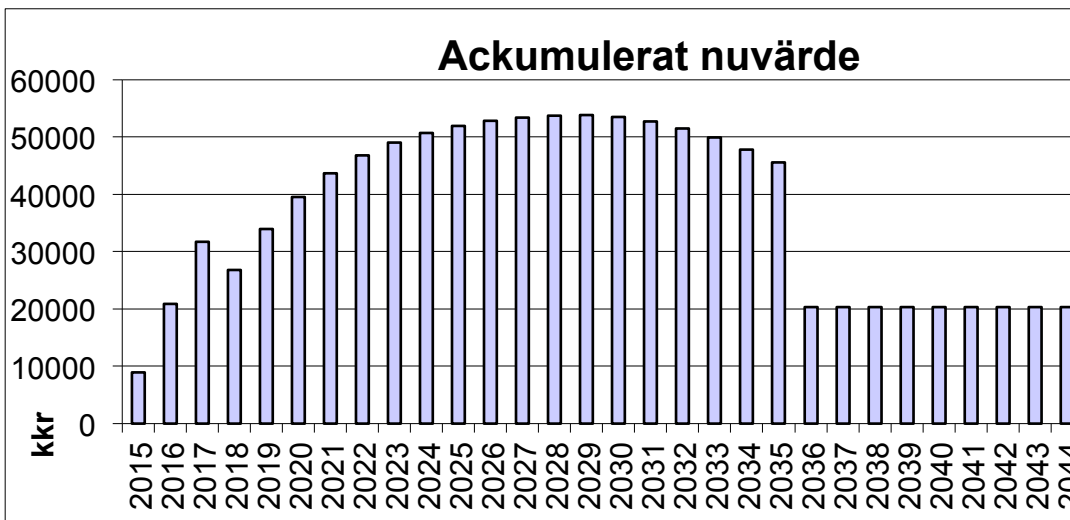
Figur 53. Sviktsannolikhet under perioden 2015-2044 för referensalternativet och för åtgärdsalternativen renovering 2018 och reinvestering av nytt löphjul 2036. I detta fall med den lägre sviktkostnaden.



Figur 54. Intäkter som är kopplade till åtgärderna; renovering 2018 och reinvestering av nytt löphjul 2036.



Figur 55. Intäkter/kostnader som är kopplade till åtgärden; renovering av löphjul 2018 och reinvestering av löphjul 2036.

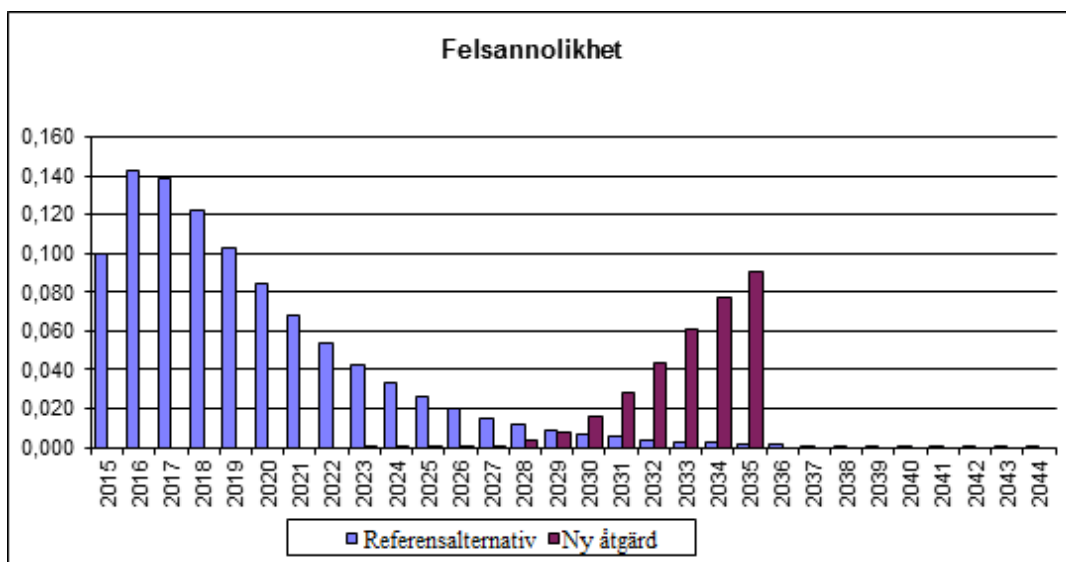


Figur 56. Ackumulerat nuvärde

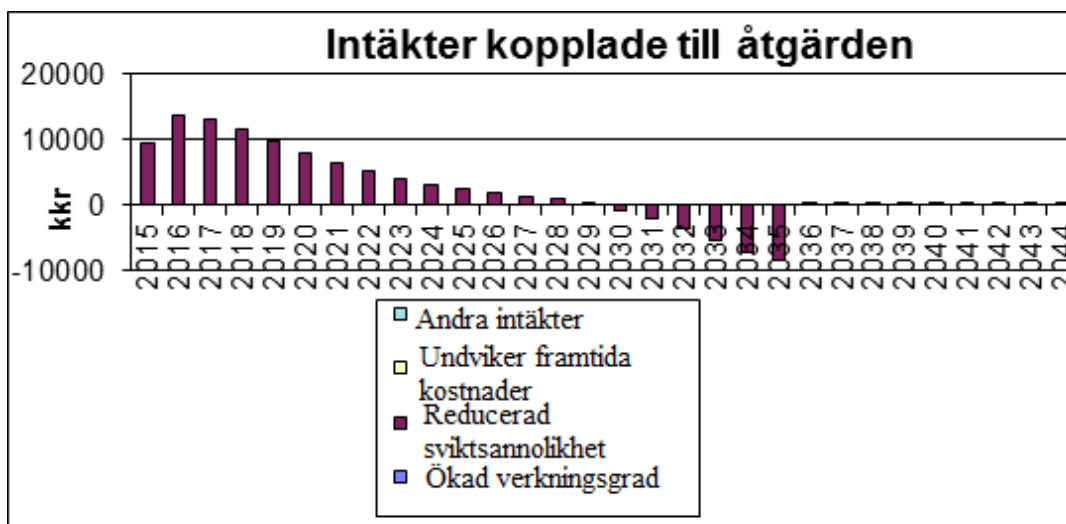
	Nuvärde																												
	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042	
Intäkter																													
Ökad verkningsgrad	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Reducerad sviktsannolikhet	59633	9409	13540	13772	11625	9794	8027	6461	5133	4040	3155	2445	1866	1385	814	119	84	2766	3775	5019	-7187	2443	123	93	70	53	40	30	22
Undviker framtida kostnader	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Andra intäkter	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Summa	59633	9409	13540	13772	11625	9794	8027	6461	5133	4040	3155	2445	1866	1385	814	119	84	2766	3775	5019	-7187	2443	123	93	70	53	40	30	22
Kostnader																													
Resurser	-18802	0	0	-2010	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Otillgänglighet under åtgärden	-8541	0	0	-2033	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Åtgärdsintroducerade fel	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Andra kostnader	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Summa	-2642	0	0	-18833	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Resultat	34191	9409	13540	13772	-208	9794	8027	6461	5133	4040	3155	2445	1866	1385	814	119	84	2766	3775	5019	-7187	2443	123	93	70	53	40	30	22
Akkumulerat nuvärde		8910	20640	31762	22884	34002	38620	43661	48782	49294	50735	51989	52834	53432	53789	53916	53894	52781	51546	49078	47067	45597	20273	20295	20310	20324	20329	20334	20338
Diskonteringsränta	6,5%																												
Nettonuvärde per budsektrona	134,4%																												

Figur 57. Sammanställning resultat renovering av löphjul 2018 med MRL=20 och 10-percentil=15 samt en reinvestering av löphjul 2036 med MRL=40 och 10-percentil=34,90. Den lägre svikt-kostnaden antas.

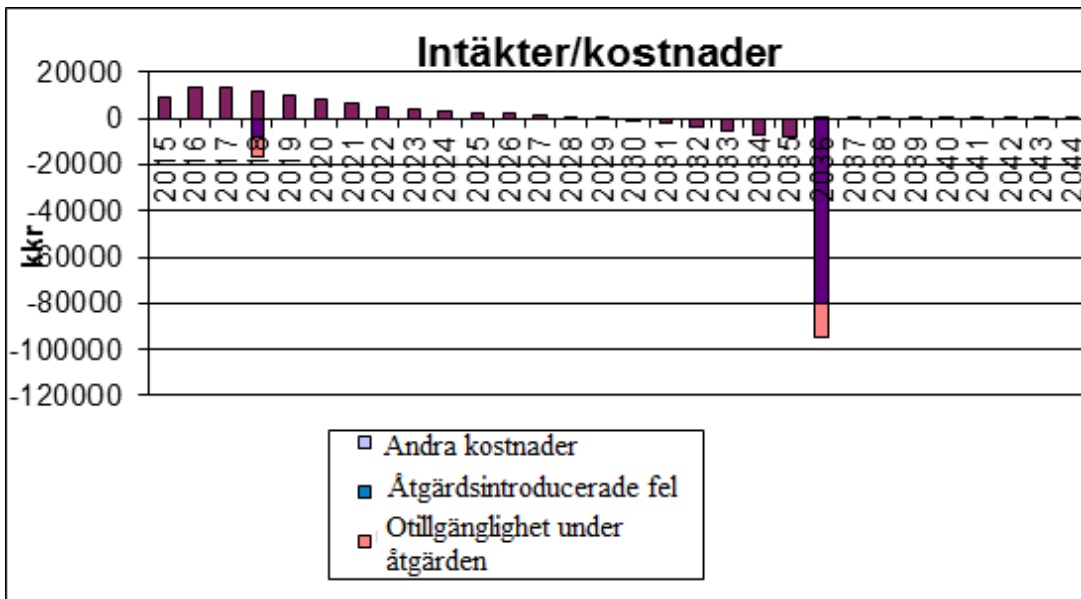
8.4.6 Åtgärd: Renovera löphjul 2018 och 2036 med MRL=20 och 10-percentil=15. Alternativ 5.



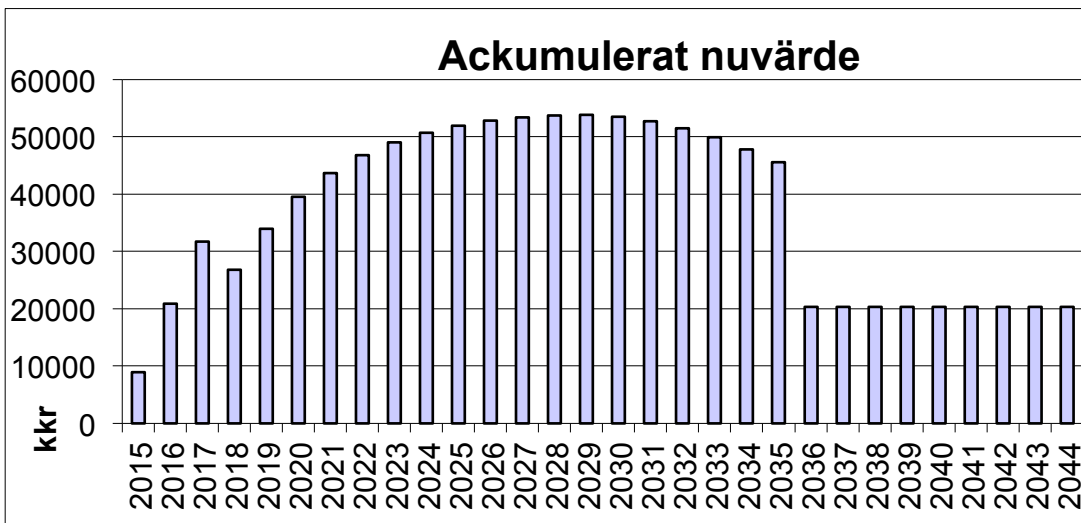
Figur 58. Sviktsannolikhet under perioden 2015-2044 för referensalternativet och för åtgärdsalternativen renovering 2018 och 2036.



Figur 59. Intäkter som är kopplade till åtgärdena; renovering av löphjul 2018 och 2036.



Figur 60. Intäkter/kostnader som är kopplade till åtgärden; renovering av löphjul 2018 och 2036.



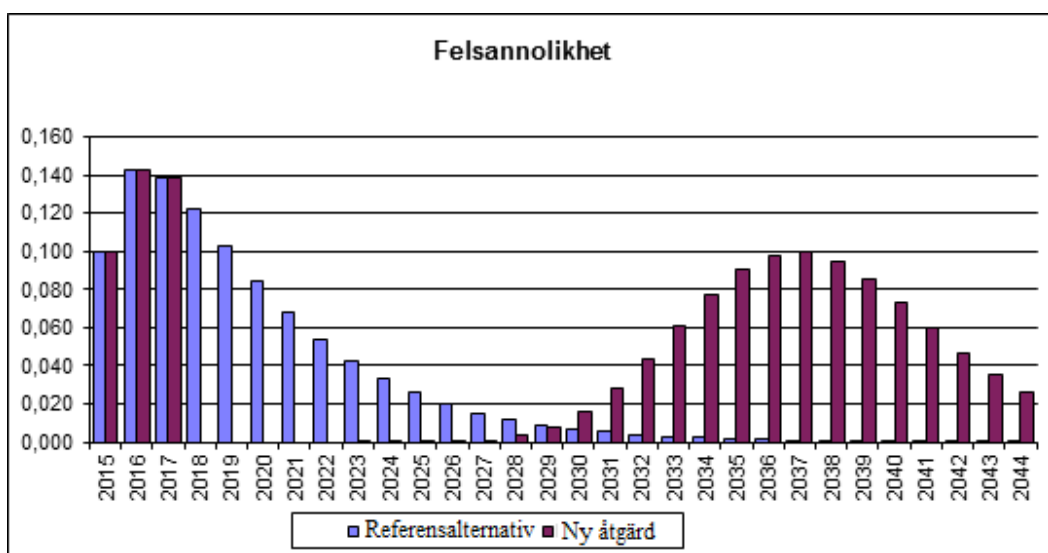
Figur 61. Ackumulerat nuvärde.

	Nuvärde	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041
Intäkter																												
Ökad verkningsgrad	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Reducerad sviktsamolikhet	2075	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Judviker framtida kostnader	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Andra intäkter	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Summa	2075	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Kostnader																												
Resurser	-1339	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Otillgänglighet under åtgärden	-2000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Åtgärdsintroducerade fel	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Andra kostnader	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Summa	-1646	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Resultat	1429	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Akkumulerat nuvärde		0	0	0	-4099	2250	7751	11900	15910	17302	18822	20236	21022	21573	22077	22553	27051	24009	-19794	16726	15094	13065	8709	8731	8706	8757	8766	8770
Diskonteringsränta	6,5%																											
Nettonuvärde per budgetkorna	89,5%																											

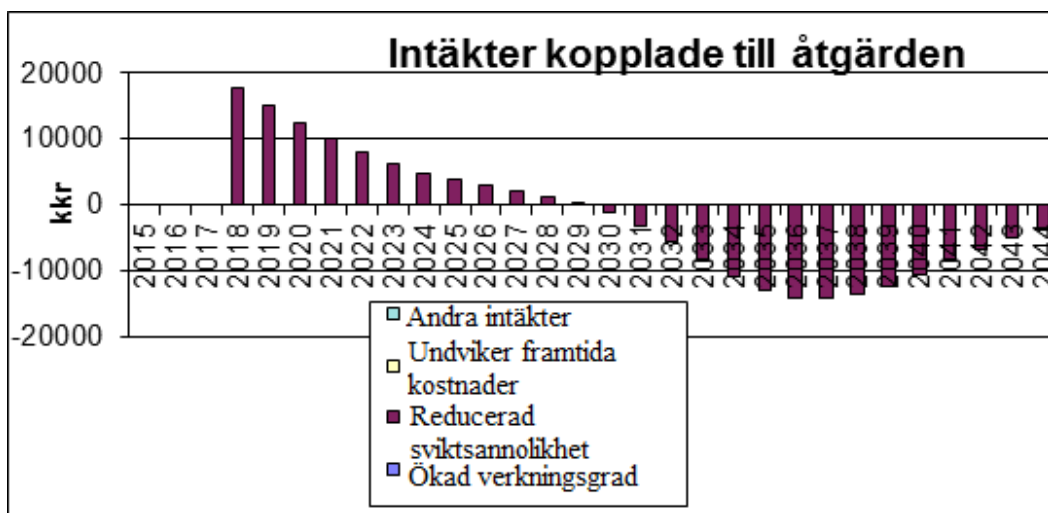
Figur 62. Sammanställning resultat renovering av löphjul 2018 och 2036 med MRL=20 med 10-percentil=15. Den lägre svikt-kostnaden antas.

8.5 Bilaga 5. Alternativ 2 till 5 med "Worst-case" SVIKT-kostnad

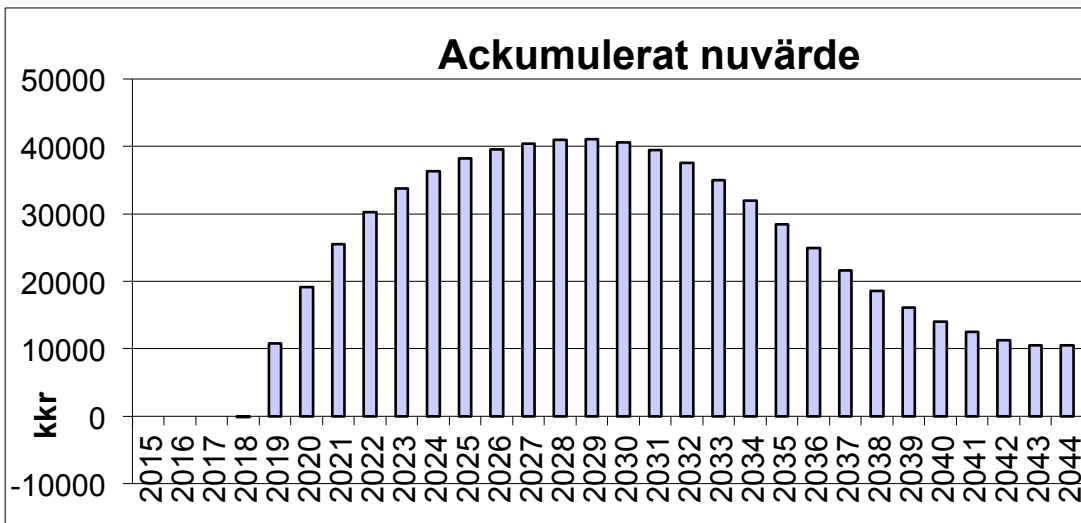
8.5.1 Åtgärd: renovera löphjul 2018 med MRL=20 och 10-percentil=15. Alternativ 2.



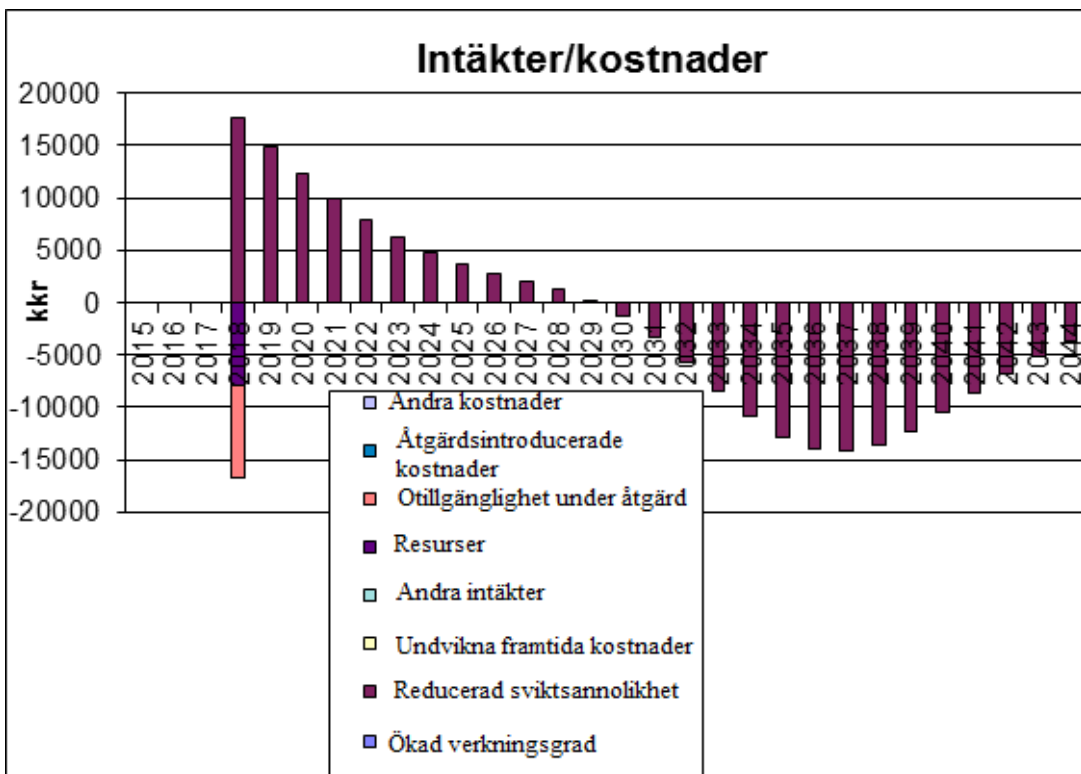
Figur 63. Sviktsannolikhet under perioden 2015-2044 för referensalternativet och för åtgärdsalternativet (renovera löphjulet 2018).



Figur 64. Intäkter som är kopplade till åtgärden (renovera löphjulet 2018).



Figur 65. Ackumulerat nuvärde.

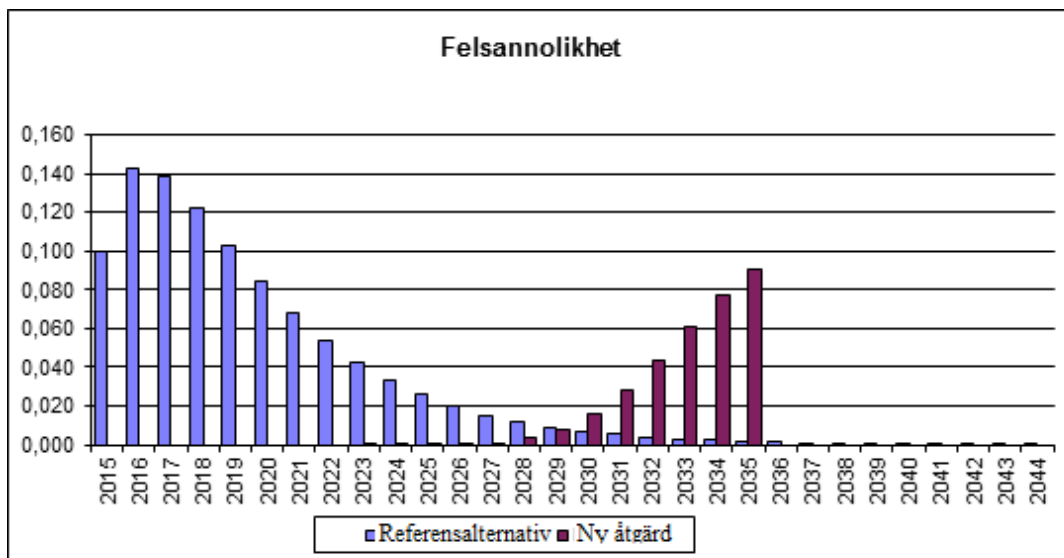


Figur 66. Intäkter/kostnader som är kopplade till åtgärden; renovering av löphjul 2018.

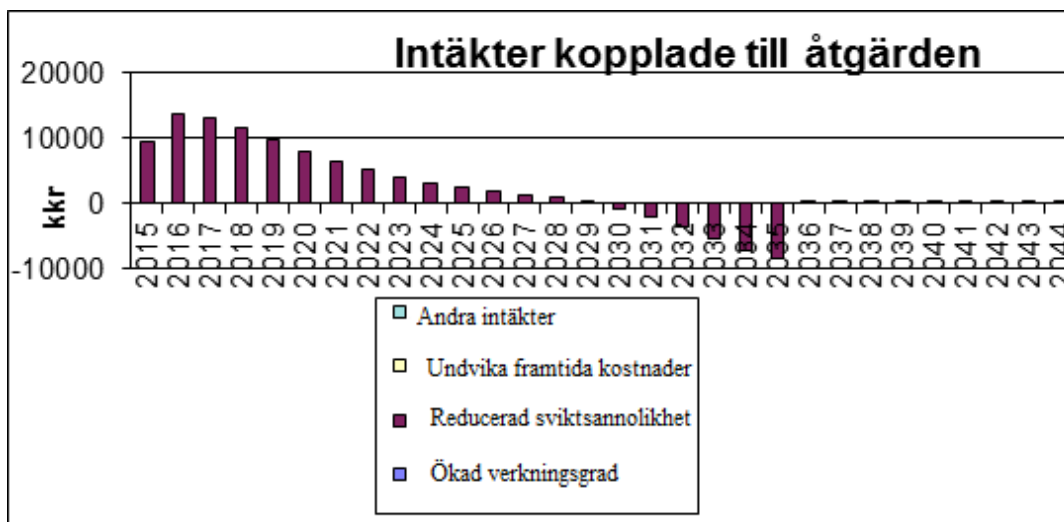
	Nuvärde	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	204
Intäkter																													
Ökad verkningsgrad	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Reducerad svikt sannolikhet	2063	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Undviker framtida kostnader	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Andra intäkter	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Summa	2063	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Kostnader																													
Resurser	-6023	0	0	0	-2000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Otillgänglighet under åtgärden	-712	0	0	0	-8033	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Åtgärdsintroducerade fel	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Andra kostnader	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Summa	-1085	0	0	0	0	-8033	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Resultat	908	0	0	0	910	1494	1257	966	708	618	497	373	260	209	144	19	-304	-308	-514	-927	-1029	-1091	-1403	-1421	-1391	-1229	-1012	-807	-575
Akkumulerat nuvärde		0	0	-137	1078	1918	2505	3022	3376	3527	3505	3353	3045	2691	2181	1655	1047	455	-347	-1166	-1919	-2492	-2971	-3424	-3825	-4106	-4270	-4373	
Diskonteringsränta	6,5%																												
Nettonuvärde per budgetkorna	71,2%																												

Figur 67. Sammanställning resultat renovering av löphjul, MRL=20 och 10-percentil=15. "Worst case" sviktkostnad antas i detta fall.

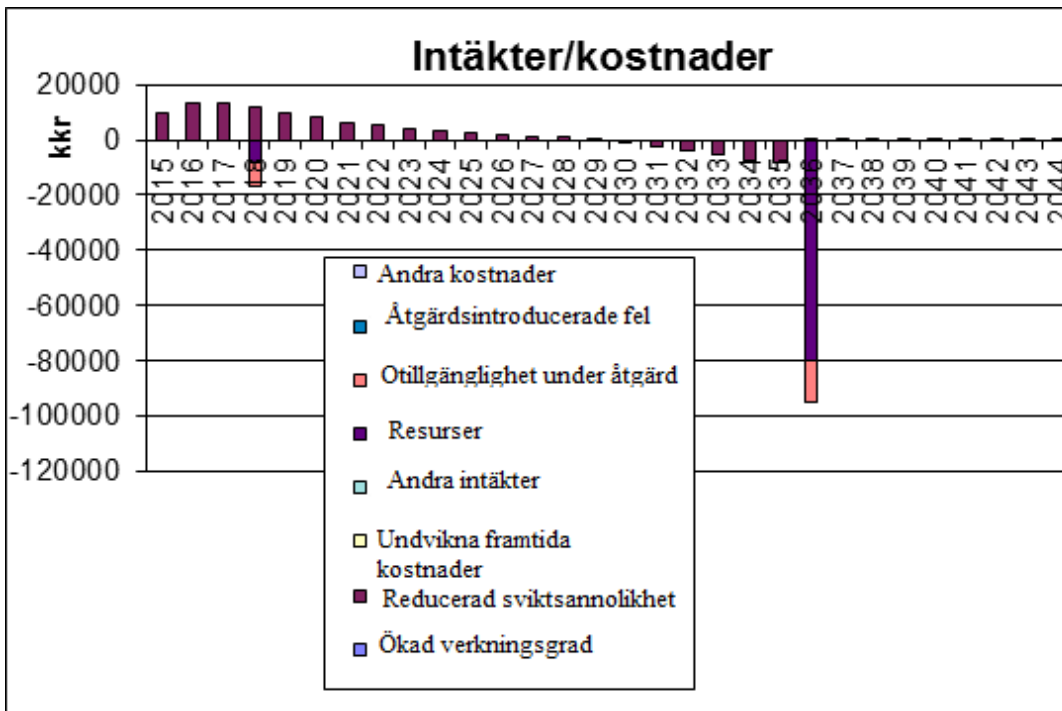
8.5.2 Åtgärd: reinvestering av löphjul 2018 med MRL=40 och 10-percentil=25. Alternativ 3:1.



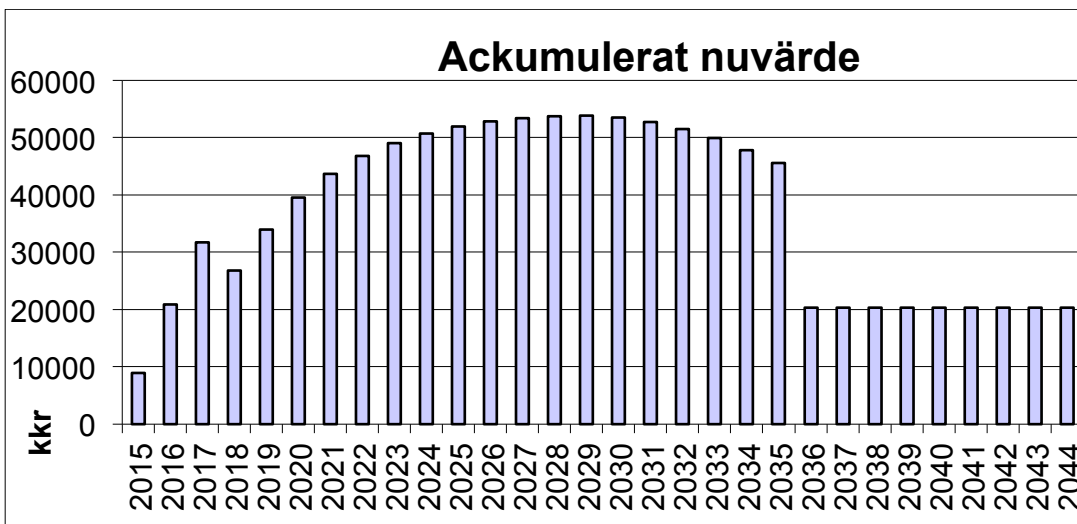
Figur 68. Sviktsannolikhet under perioden 2015-2044 för referensalternativet och för åtgärdsalternativet (reinvestera nytt löphjul med MRL=40 och 10-percentil=25).



Figur 69. Intäkter som är kopplade till åtgärden(reinvestera nytt löphjul 2018).



Figur 70. Intäkter/kostnader som är kopplade till åtgärden; reinvestering av löphjul 2018.

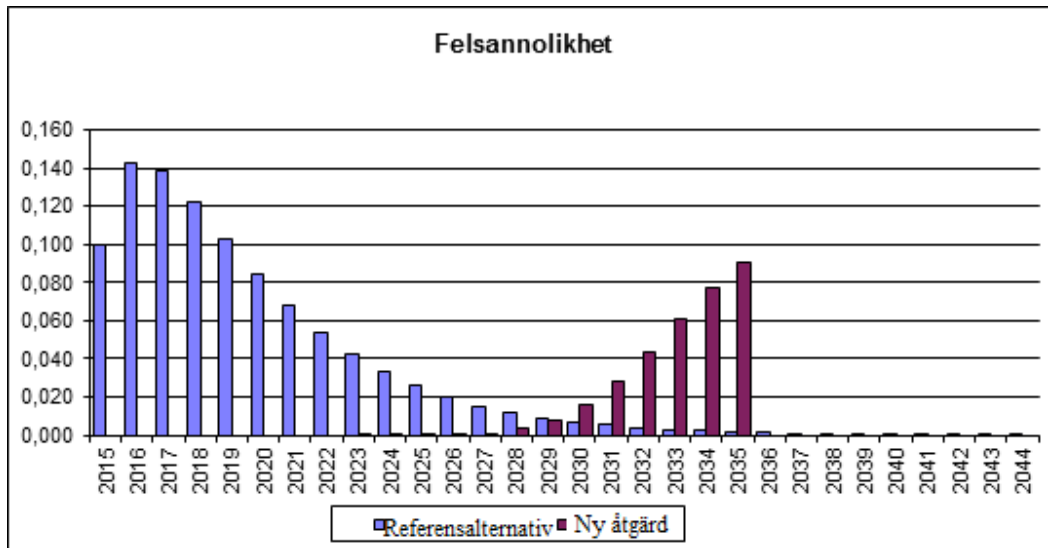


Figur 71. Ackumulerat nuvärde.

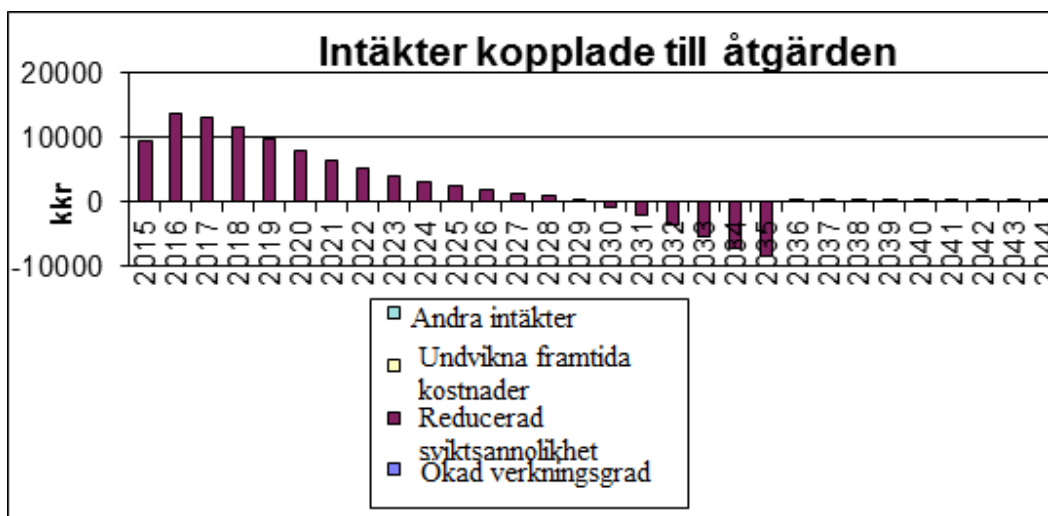
	Nuvärde																															
	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042	2043	2044		
Intäkter																																
Ökad verkningseffekt	1573	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
Reducerad sviktsannolikhet	2203	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
Undvikter framtida kostnader	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
Andra intäkter	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
Summa	3442	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
Kostnader																																
Resurser	-35070	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
Otillgänglighet under åtgärden	-974	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
Åtgärdsintroducerade fel	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
Andra kostnader	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
Summa	-36044	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
Resultat	400	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
Akkumulerat nuvärde	751	1457	2139	26376	41024	50824	51944	50887	31944	28728	22738	15107	7735	-5524	4425	13188	12531	11631	11713	10771	9469	10253	10116	10253	10167	10124	10249	10427	10552	10517	10716	10716
Diskonteringsrenta	6,5%																															
Nettonuvärde per budgetkorna	59%																															

Figur 72: Sammanställning resultat reinvestering löphjul, MRL=40 och 10-percentil=25. Med ”Worst case” svikt-kostnaden.

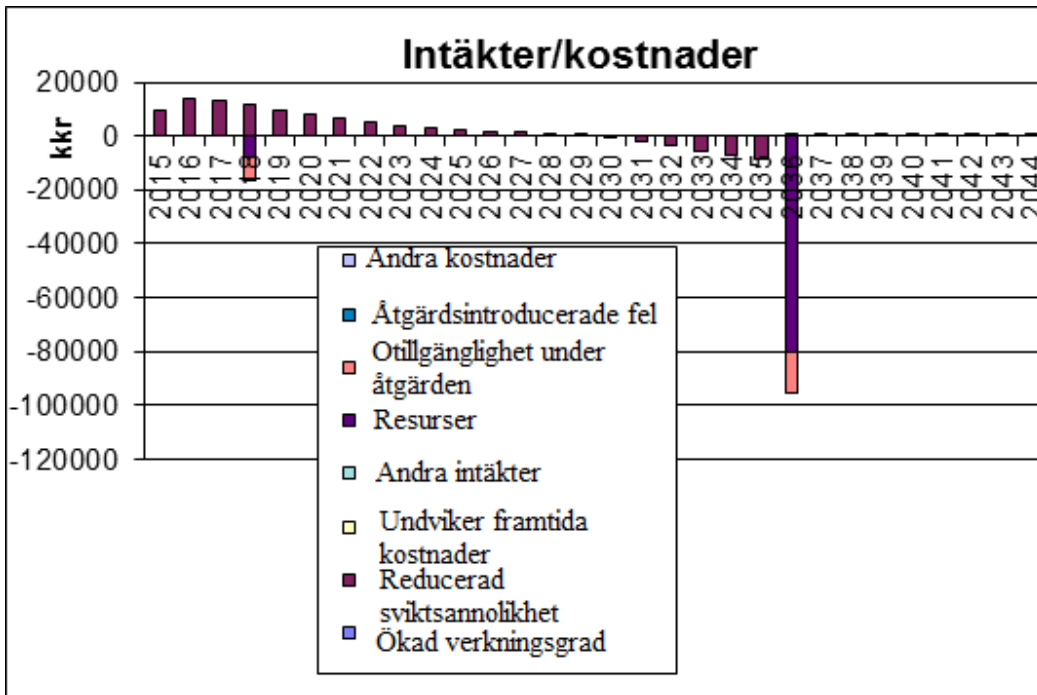
**8.5.3 Åtgärd: reinvestera löphjul 2018 med MRL=40 och 10-percentilen=30.
Alternativ 3:2.**



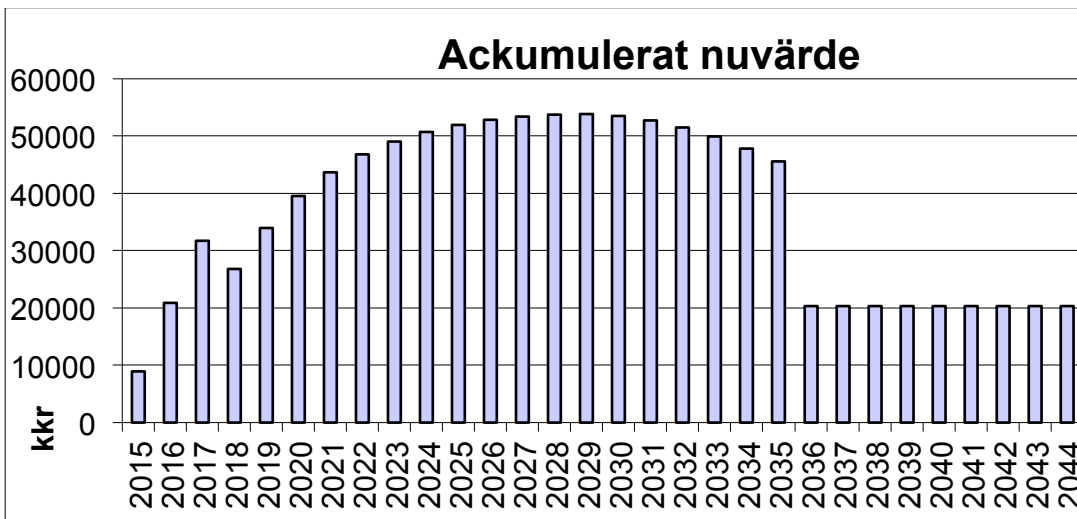
Figur 73. Sviktsannolikhet under perioden 2015-2044 för referensalternativet och för åtgärdsalternativet (reinvestera nytt löphjul 2018 med MRL=40 och 10-percentil=30).



Figur 74. Intäkter som är kopplade till åtgärden (reinvestera nytt löphjul 2018).



Figur 75. Intäkter/kostnader som är kopplade till åtgärden; reinvestering av löphjul 2018.

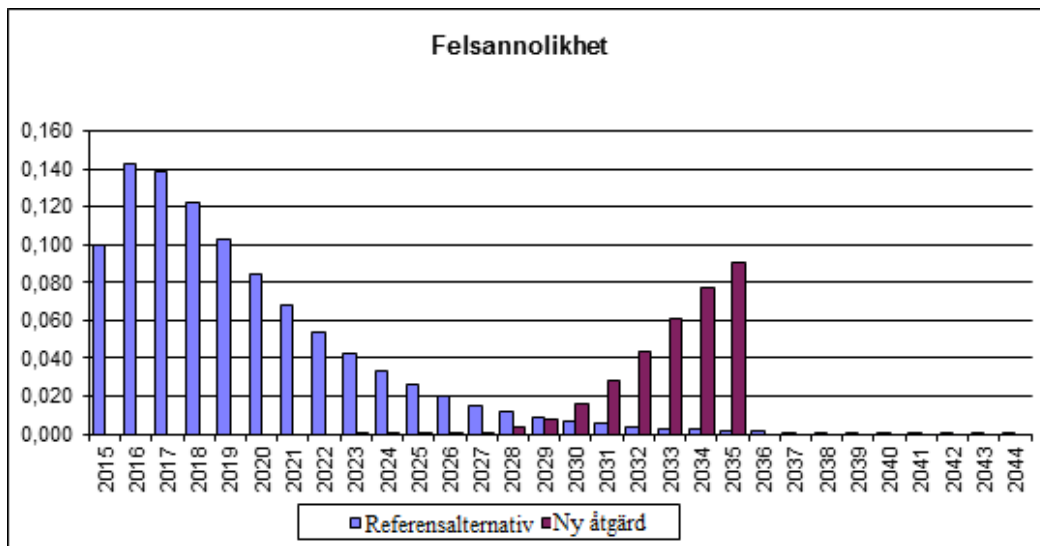


Figur 76. Akkumulerat nuvärde.

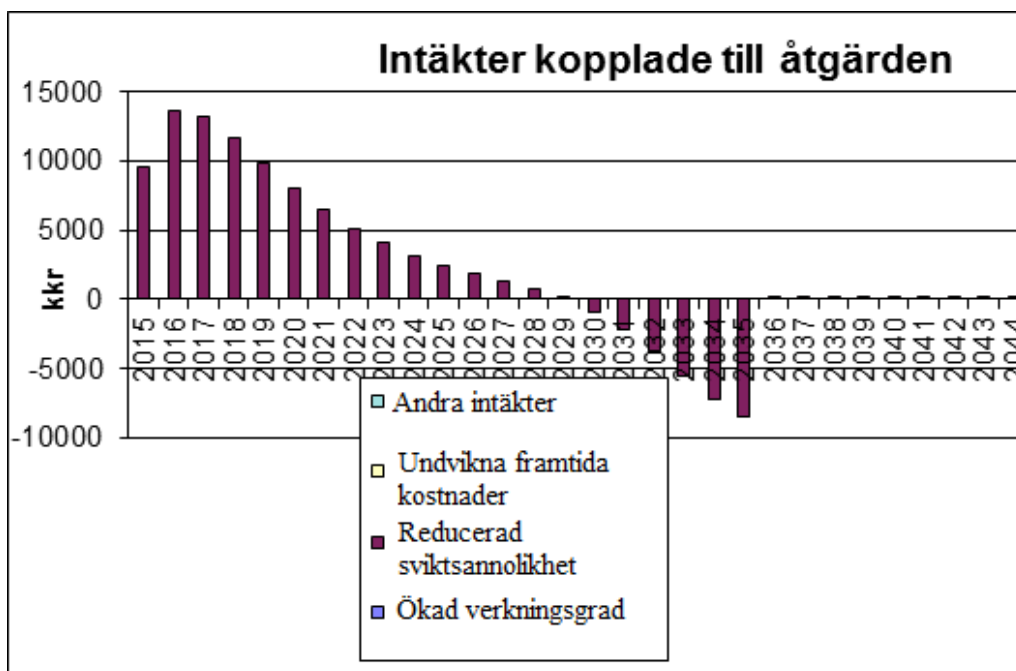
	Nuvärde																											
	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042
Intäkter																												
Ökad verkningssgrad	14379																											
Reducerad sviktsamhället	55337																											
Undvikter framtida kostnader	0																											
Andra intäkter	0																											
Summa	67399																											
Kostnader																												
Resurser																												
Otillgänglighet under åtgärden	-59570																											
Åtgärdsintroducerade fel	4784																											
Andra kostnader	0																											
Summa	-54786																											
Resultat	12513																											
Akkumulerat nuvärde	751 1453	2739	55376	4784	-30070	31944	-26729	22738	-19706	-17393	-15676	-14230	-13155	-12291	-11509	-10800	-10169	-9735	-9476	-9136	-8892	-8666	-8470	-8294	-8230	-8171	-8116	
Diskonteringsränta	6,5 %																											
Nettonuvärde per budgetkoma	-14 %																											

Figur 77. Sammanställning resultat reinvestering löphjul, MRL=40 och 10-percentil=30. Med "worst case" svikt-kostnaden.

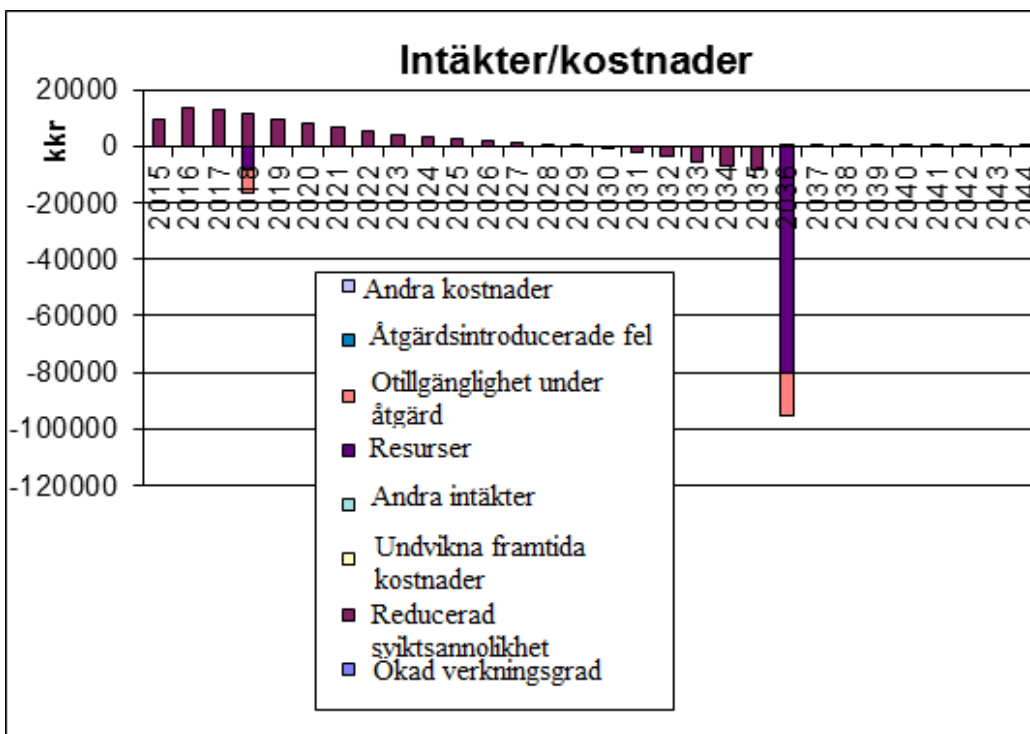
**8.5.4 Åtgärd: reinvestera löphjul med MRL=40 och 10-percentil=34,90.
Alternativ 3:3.**



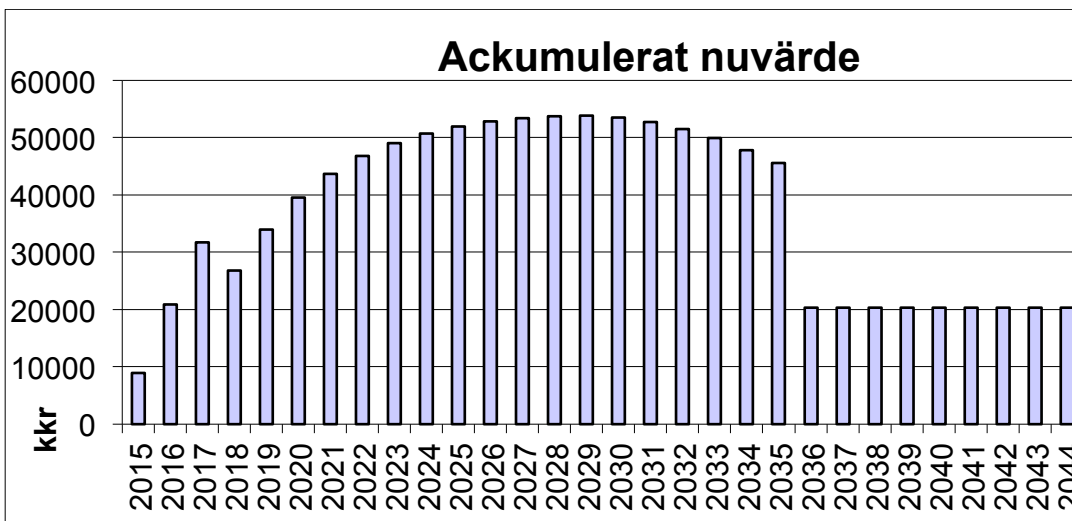
Figur 78. Sviktsannolikhet under perioden 2015-2044 för referensalternativet och för åtgärdsalternativet (reinvestera nytt löphjul 2018 med MRL=40 och 10-percentil=34,90).



Figur 79. Intäkter som är kopplade till åtgärden (reinvestera nytt löphjul 2018).



Figur 80. Intäkter/kostnader som är kopplade till åtgärden; reinvestering av löphjul 2018.

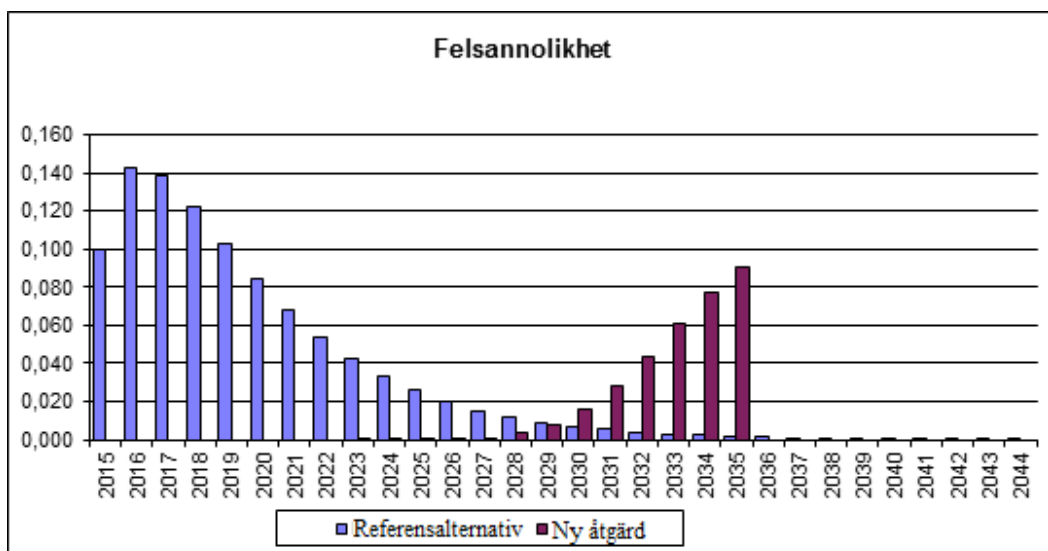


Figur 81. Akkumulerat nuvärde.

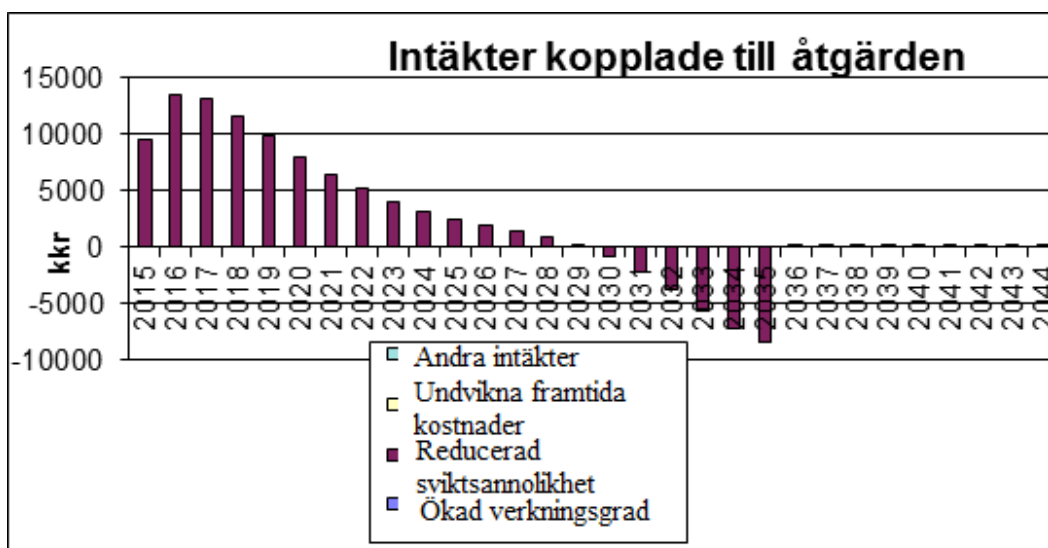
	Nuvärde																									
	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040
Intäkter																										
Ökad verkningssgrad	11579	800	808	816	824	832	841	849	857	866	875	883	892	901	910	919	929	938	947	957	966	976	986	996	1005	1025
Reducerad sviktsannolikhet	58035	0	0	0	17751	14954	12257	9965	7838	6188	4918	3141	2090	2224	1765	1304	994	757	575	435	330	249	188	142	107	80
Undvikter framtida kostnader	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Andra intäkter	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Summa	69613	800	808	816	10025	15706	13097	10714	8695	7024	5692	4624	3782	3125	2616	2223	1923	1695	1522	1382	1295	1225	1174	1137	1112	1095
Kostnader																										
Resurser	-58678	0	0	0	-30000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Otillgänglighet under åtgärden	-1764	0	0	0	-11749	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Åtgärdsintroducerade fel	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Andra kostnader	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Summa	-59441	0	0	0	-91749	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Resultat	72	800	808	816	21877	15706	13097	10714	8695	7024	5692	4624	3782	3125	2616	2223	1923	1695	1522	1382	1295	1225	1174	1137	1112	1095
Akkumulerat nuvärde		751	1463	2139	35376	47024	36876	21924	28729	22739	-19706	-17393	-15916	-14239	-13155	-12294	-11598	-11008	-10518	-10097	-9729	-9402	-9109	-8842	-8599	-8358
Diskonteringsränta	63%																									
Nettonuvärde per budgetkorna	015																									

Figur 82. Sammanställning av resultat reinvestering löphjul, MRL=40 och 10-percentil=34,90. "Worst case" sviktkostnaden antas i detta fall.

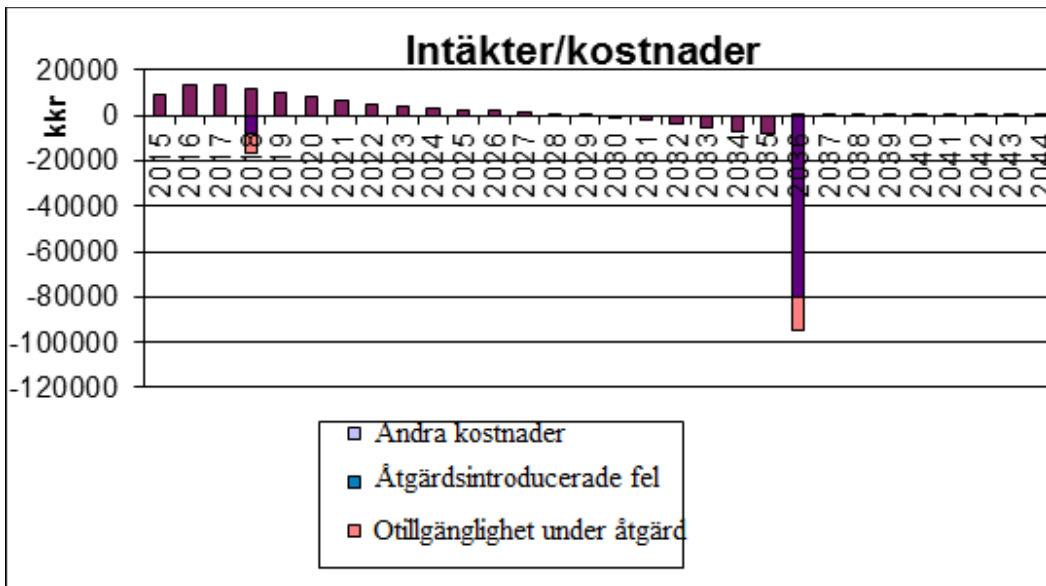
8.5.5 Åtgärd: Renovera löphjul 2018 med MRL=20 och 10-percentil=15 och reinvestera 2036 med MRL=40 och 10-percentil=34,90. Alternativ 4.



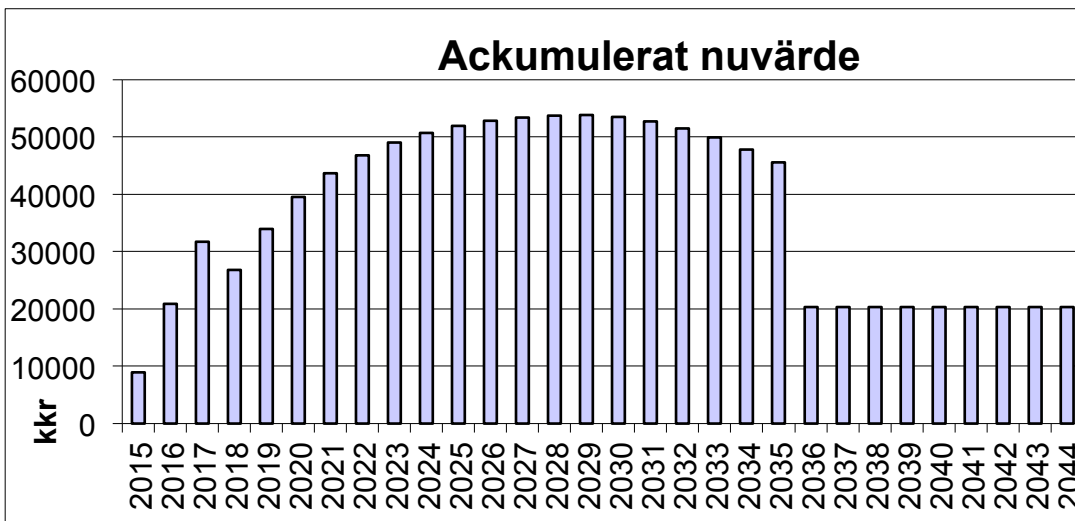
Figur 83. Sviktsannolikhet under perioden 2015-2044 för referensalternativet och för åtgärdsalternativen renovering 2018 och reinvestering av nytt löphjul 2036.



Figur 84. Intäkter som är kopplade till åtgärdena; renovering av löphjul 2018 och reinvestering av löphjul 2036.



Figur 85. Intäkter/kostnader som är kopplade till åtgärden; renovering 2018 och reinvestering av löphjul 2036.

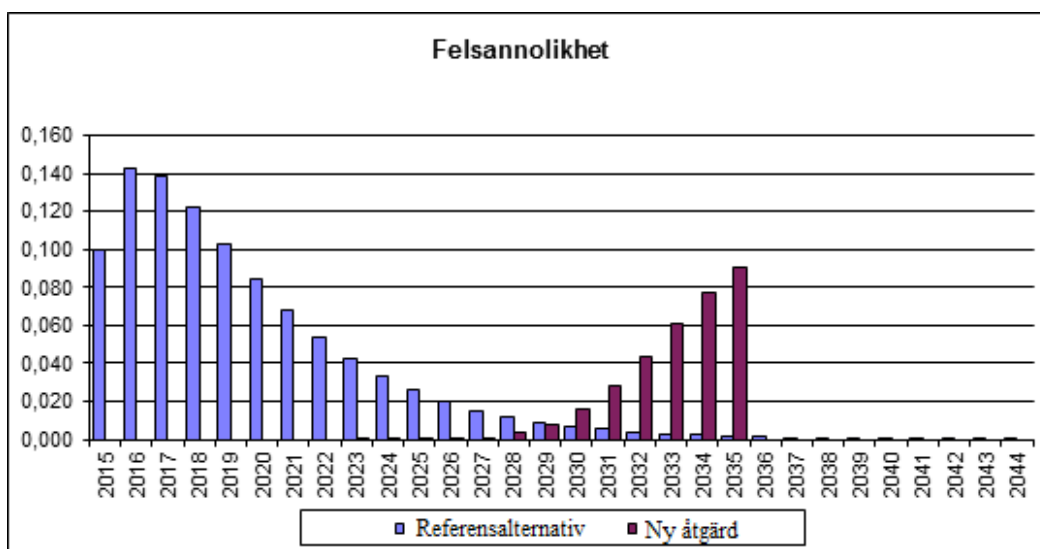


Figur 86. Akkumulerat nuvärde.

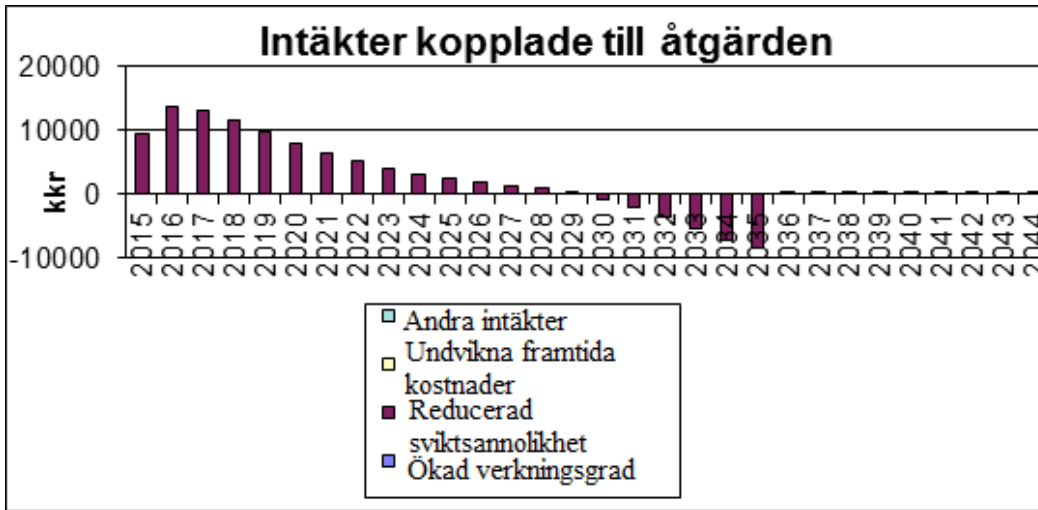
	Nuvärde																											
	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	20
Intäkter																												
Ökad verkningssgrad	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Reducerad sviktsamolikhet	67197	14409	20575	20112	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Undvikter framtida kostnader	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Andra intäkter	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Summa	67197	14409	20575	20112	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Kostnader																												
Resurser	-16902	0	0	-3000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ortillgänglighet under åtgärden	3641	0	0	-3033	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Åtgärdsintroducerade fel	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Andra kostnader	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Summa	-2442	0	0	-1633	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Resultat	41740	14409	20575	20112	16033	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Akkumulerat nuvärde		13905	31033	40403	30340	30340	30340	30340	30340	30340	30340	30340	30340	30340	30340	30340	30340	30340	30340	30340	30340	30340	30340	30340	30340	30340	30340	283
Diskonteringsränta	65%																											
Nettonuvärde per budgetkomma	1641%																											

Figur 87. Sammanställning av resultat renovering av löphjul och reinvestering löphjul. "Worst case" sviktkostnaden antas i detta fall.

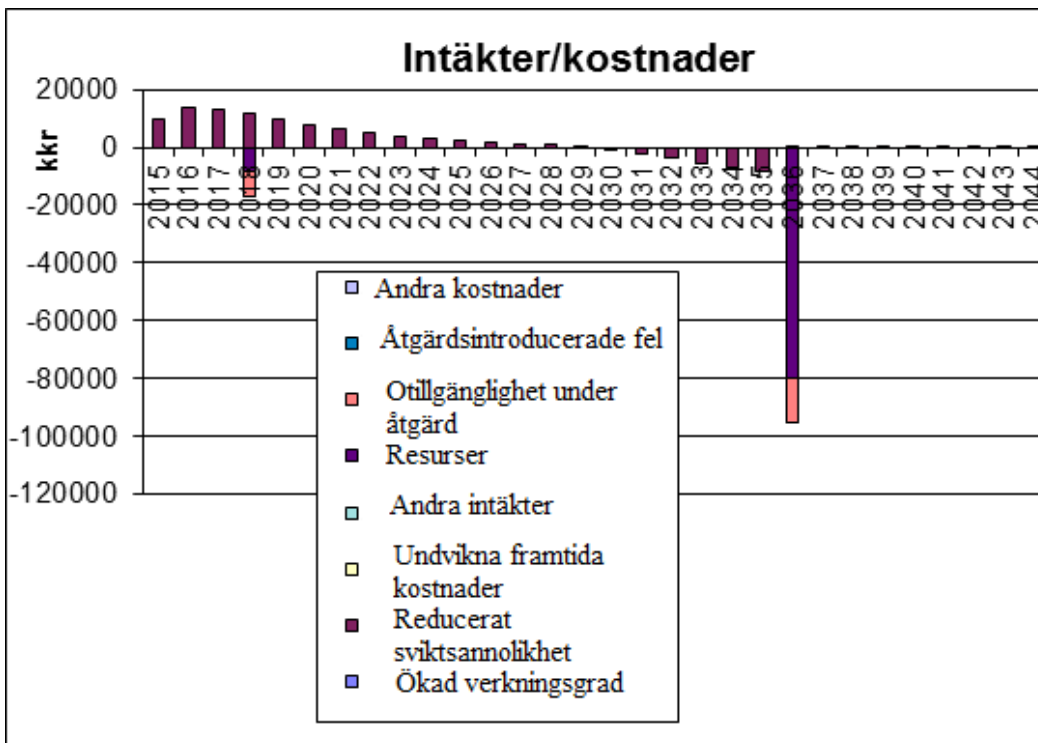
8.5.6 Åtgärd: Renovera löphjul 2018 och 2036 med MRL=20 och 10-percentil=15. Alternativ 5.



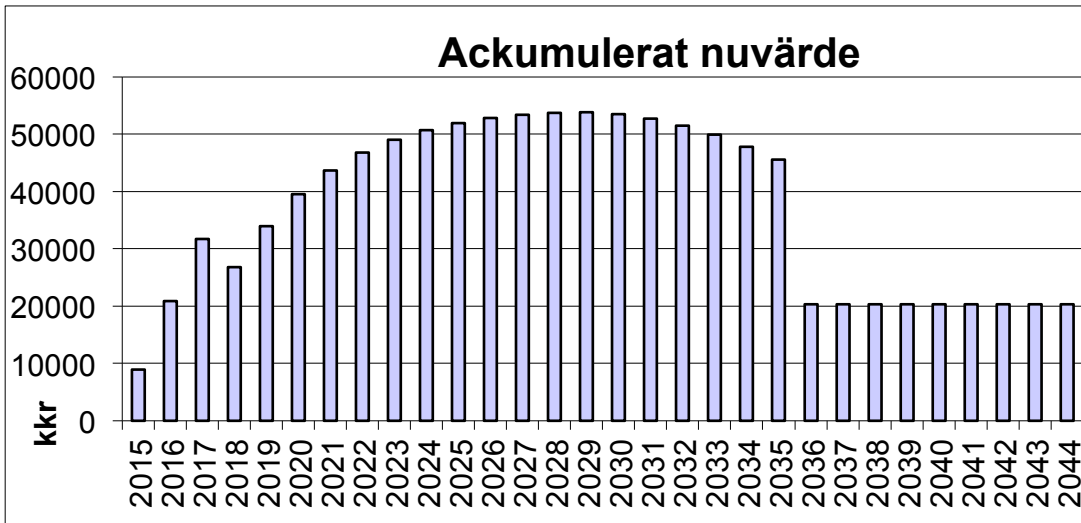
Figur 88. Sviktsannolikhet under perioden 2015-2044 för referensalternativet och för åtgärdsalternativen renovering 2018 och 2036.



Figur 89. Intäkter som är kopplade till åtgärderna; renovering av löphjul 2018 och 2036.



Figur 90. Intäkter/kostnader som är kopplade till åtgärderna; renovering av löphjul 2018 och 2036.



Figur 91. Ackumulerat nuvärde.

	Nuvärde	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041
Intäkter																												
Ökad verkningsgrad	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Reducerad sviktsannolikhet	42364	0	0	0 17751	14524	12257	9955	7838	6168	4917	3733	2630	2069	1244	101	-1304	-3308	-5764	-8427	-10929	-12891	188	142	107	80	60	45	30
Undviker framtida kostnader	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Andra intäkter	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Summa	42364	0	0	0 17751	14524	12257	9955	7838	6168	4917	3733	2630	2069	1244	101	-1304	-3308	-5764	-8427	-10929	-12891	188	142	107	80	60	45	30
Kostnader																												
Resurser	-1038	0	0	0 4000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Otillgänglighet under åtgärden	-8000	0	0	0 4833	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Åtgärdsintroducerade fel	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Andra kostnader	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Summa	-16446	0	0	0 16833	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Resultat	26117	0	0	0 910	14524	12257	9955	7838	6168	4917	3733	2630	2069	1244	101	-1304	-3308	-5764	-8427	-10929	-12891	188	142	107	80	60	45	30
Ackumulerat nuvärde		0	0	0 -137	10178	19178	28326	36882	43761	49227	53195	55633	4446	40561	41031	40555	39427	37566	34719	31917	28482	23363	23366	23420	23426	23440	23456	23472
Diskontingsranta	65%																											
Nettonuvärde per budgetkorna	439,8%																											

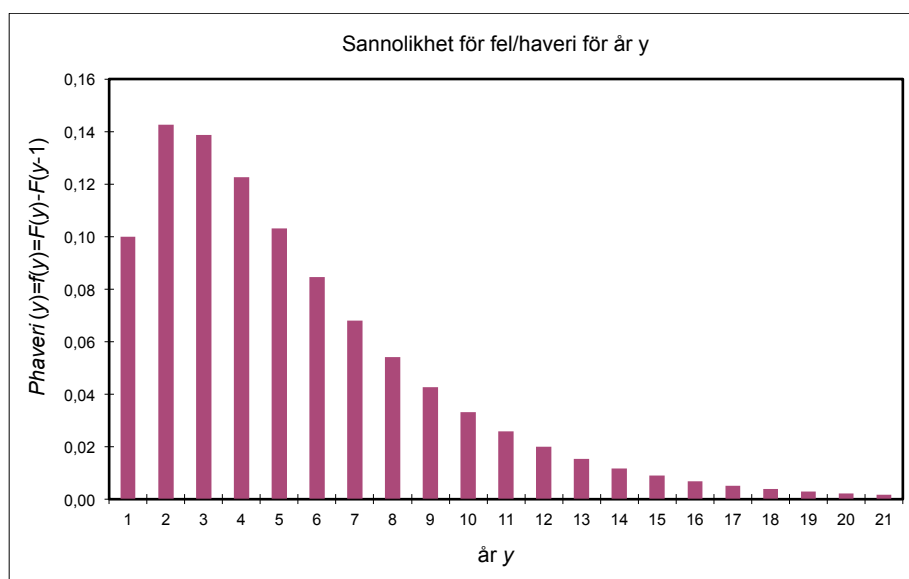
Figur 92. Sammanställning av resultat renovering av löphjul 2018 och 2036. "Worst case" sviktkostnaden antas i detta fall.

8.6 Bilaga 6. Levnadskurvor

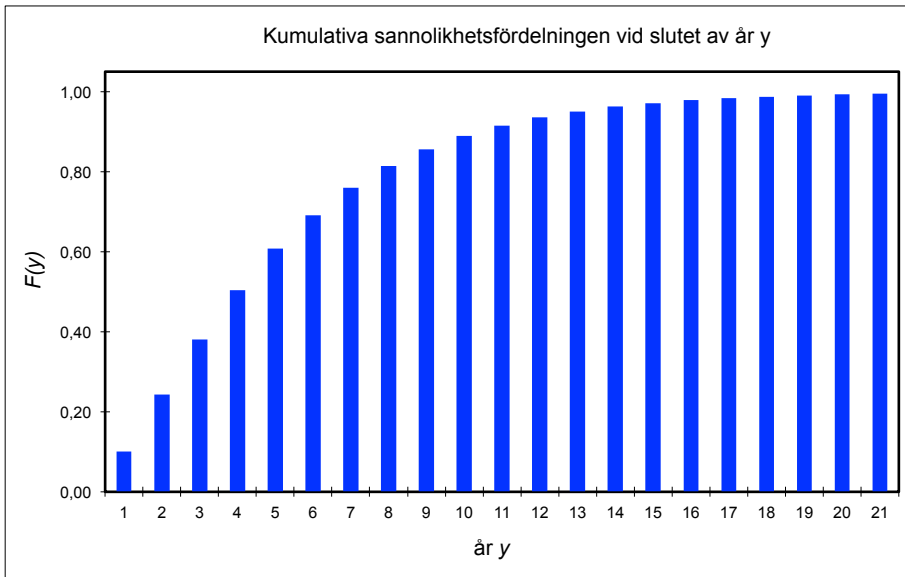
8.6.1 Levnadskurvor innan åtgärd med MRL = 5 och 10-percentil = 1.

Resultat för:	Gammafördelningen	
Formparameter:	alpha	1,53
	beta	3,26
	t	$F(t)$
10-percentil	1,00 År	10,000 %
Återstående medellivslängd	5,00 år	60,723 %

Figur 93. Parametrar till gammafördelning vid generering av levnadskurvor i EFP 2015 och framåt.



Figur 94. Sannolikhetsfördelning för svikt från 2015 och framåt.

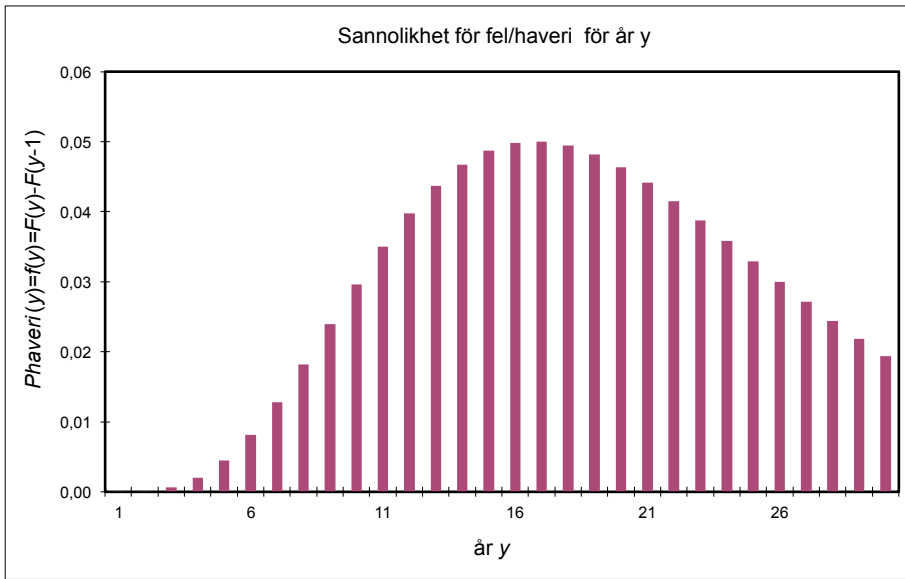


Figur 95. Kumulativ sannolikhetsfördelning för svikt från 2015 och framåt.

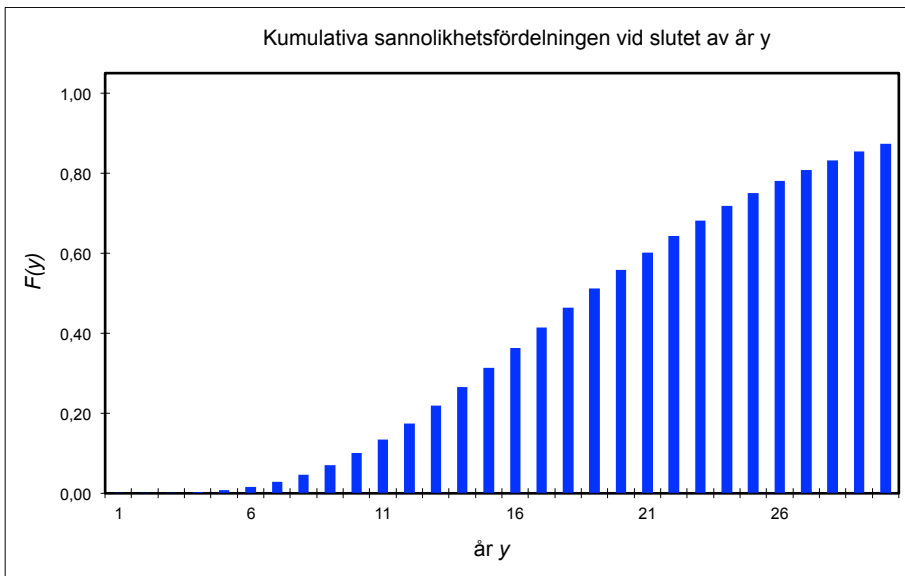
8.6.2 Levnadskurvor efter reovering med MRL=20 och 10-percentil=15

Resultat för:	Gammafördelningen	
Formparameter:	alpha	24,21
	beta	0,83
	<i>t</i>	<i>F(t)</i>
10th-percentil	15,00 år	10,000 %
Återstående medellivslängd	20,00 år	52,703 %

Figur 96. Parametrar till gammafördelning vid generering av levnadskurvor i EFP efter en reovering.



Figur 97. Sannolikhetsfördelning för svikt efter en renovering.

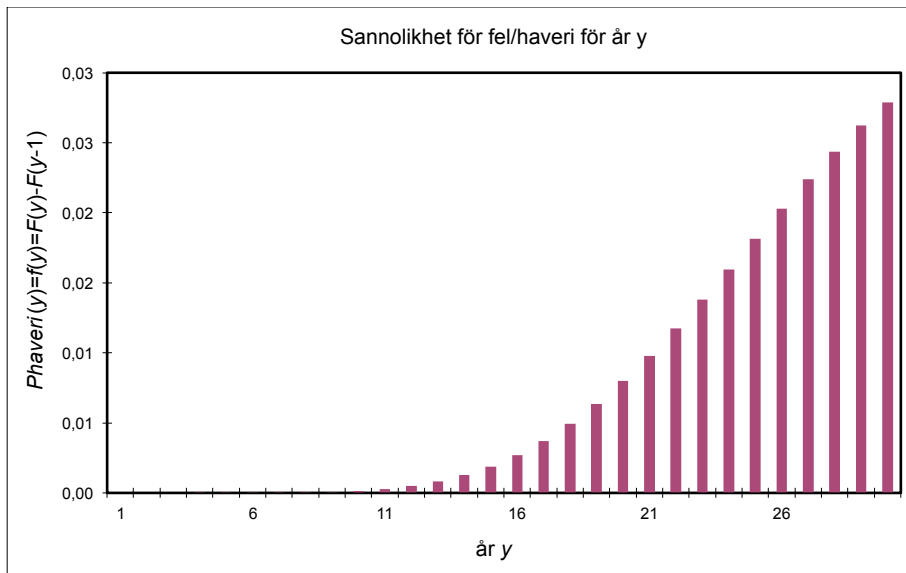


Figur 98. Kumulativ sannolikhetsfördelning för svikt efter en renovering.

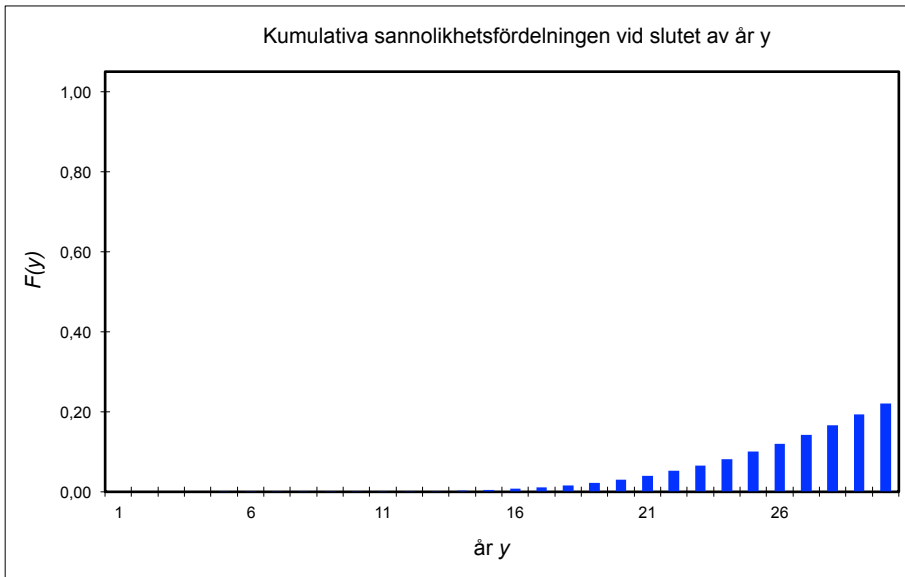
8.6.3 Levnadskurvor efter reinvestering med MRL=40, och 10-percentil 25

Resultat för:	Gammafördelningen	
Formparameter:	alpha	10,17
	beta	3,93
	t	$F(t)$
10-percentil	25,00 År	10,000 %
Återstående medellivslängd	40,00 År	54,172 %

Figur 99. Parametrar till gammafördelning vid generering av levnadskurvor efter en reinvestering.



Figur 100. Sannolikhetsfördelning för svikt efter en reinvestering.



Figur 101. Kumulativ sannolikhetsfördelning för svikt efter en reinvestering.

8.6.4 Levnadskurvor efter reinvestering med MRL = 40 och 10-percentil = 34,9

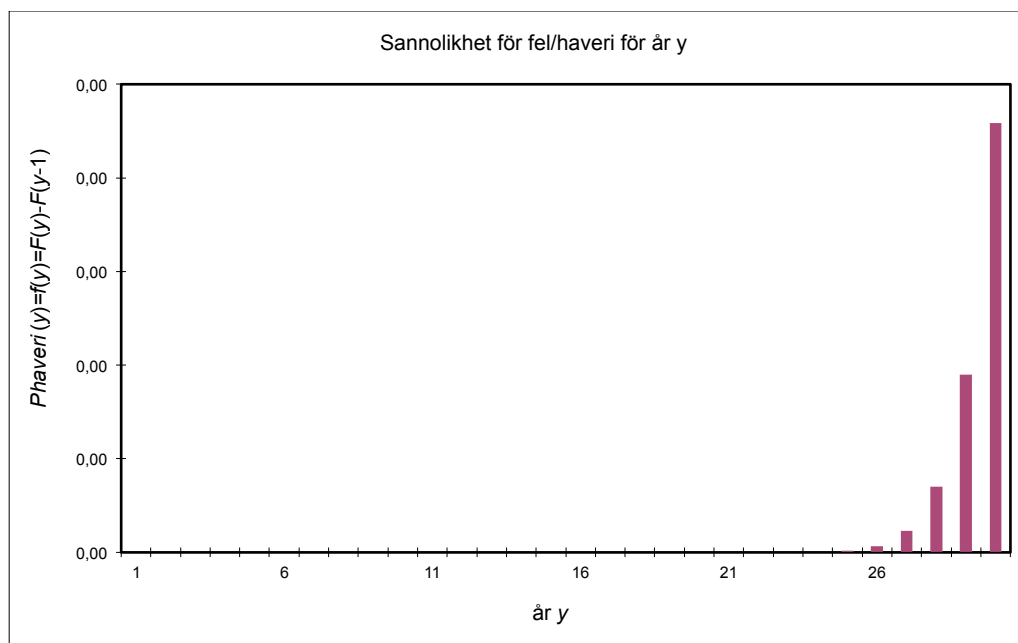
Resultat för:		Gammafördelningen	
Formparameter:	alpha	97,33	
	beta	0,41	
	<i>t</i>		<i>F(t)</i>
10-percentil	34,90 År		10,000 %
Mean residual life	40,00 År		51,348 %

Figur 102. Parametrar till gammafördelning vid generering av levnadskurvor efter en reinvestering.

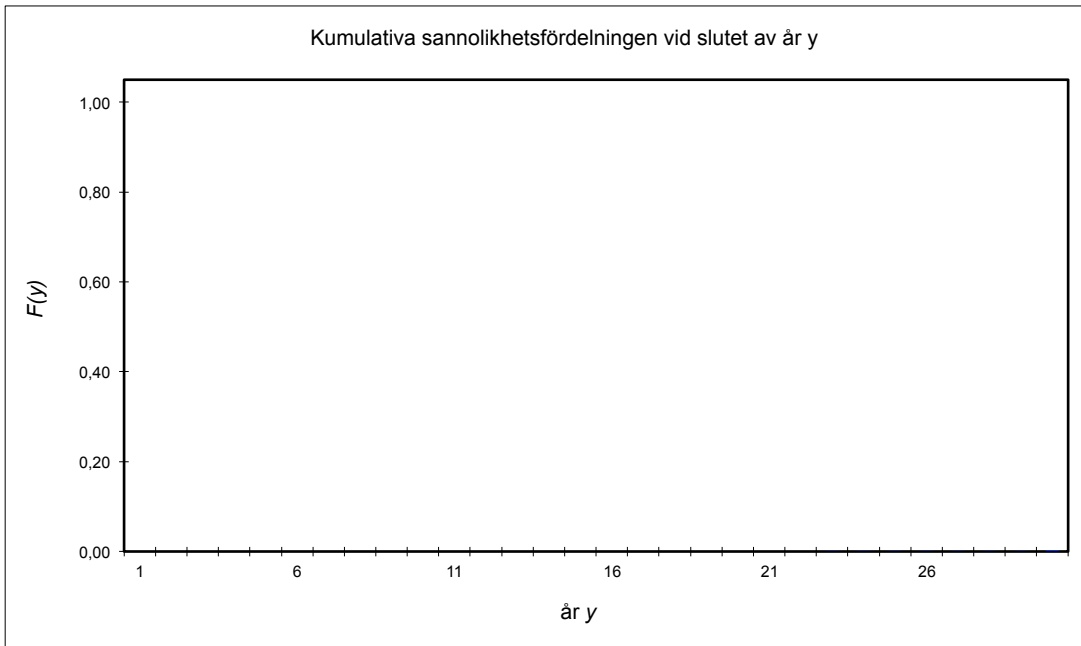
8.6.5 Levnadskurvor efter reinvestering med MRL = 40 och 10-percentil = 30

Resultat för:	Gammafördelningen	
Formparameter:	alpha	24,21
	beta	1,65
	<i>t</i>	<i>F(t)</i>
10-percentil	30,00 År	10,000 %
Återstående medellivslängd	40,00 År	52,703 %

Figur 105. Parametrar till gammafördelning vid generering av levnadskurvor efter en reinvestering.



Figur 106. Sannolikhetsfördelning för svikt efter en reinvestering.



Figur 107. Kumulativ sannolikhetsfördelning för svikt efter en reinvestering.

8.7 Bilaga 7. Expertgruppens uppskattningar av MRL och 10-percentiler.

8.7.1 Uppskattningar innan åtgärder.

Komponenter	Skadetyper	Felorsaker	MRL i år	10-percentil i år
Löphjul - skovlar	Normalt slitage	Kavitation	100	87
Löphjul – glandring (yttre och inre lagringar)	Läckage	Mekaniskt slitage	5	1
Löphjul – nav (invändigt)	Normalt slitage	Mekaniskt slitage, åldring	20	7
Löphjul – nav (utvändigt)	Normalt slitage	Kavitation	100	87
Turbinaxel -koppling och bultförband	Sprickor	Korrosion	100	87
Turbinnära vattenvägar – löphjulskammare	Normalt slitage	Kavitation	100	30
Ledskovel – övre lagring	Läckage i skovelpackning	Mekaniskt slitage	5	2
Pådragscylindrarna	Normalt slitage	Läckage	10	1
Packbox	Normalt slitage	Mekaniskt slitage	20	1
Turbinstyrlager (tätning)	Skador på lagerytor	Vibrationer	25	1
Turbinstyrlager (vidgning)	Funktionsavvikelse utrustning	Vibrationer	25	1
Tryckoljesystem – avlastningsventiler	Normalt slitage	Vibrationer	10	2
Kombinator	Läckage	Trasiga tätningar	5	2
Styrverk	Normalt slitage	Mekanisk beläggning	1	0,00273973

8.7.2 Uppskattningar efter åtgärder, expert 1.

Komponenter	Skadetyper	Felorsaker	MRL i år	10-percentil i år	MRL i år efter renovering	10-percentil i år	MRL i år efter reinvestering	10-percentil i år
Löphjul - skovlar	Normalt slitage	Kavitation	100	87				
Löphjul – glandring (yttre och inre lagringar)	Läckage	Mekaniskt slitage	5	1	20	15	40	34,9
Löphjul – nav (invändigt)	Normalt slitage	Mekaniskt slitage, åldring	20	7				
Löphjul – nav (utvändigt)	Normalt slitage	Kavitation	100	87				
Turbinaxel - koppling och bultförband	Sprickor	Korrosion	100	87				
Turbinnära vattenvägar – löphjulsammare	Normalt slitage	Kavitation	100	30				
Ledskovvel – övre lagring	Läckage i skovelpackning	Mekaniskt slitage	5	2	20	18	20	18
Pådragscylindrar	Normalt slitage	Läckage	10	1				
Packbox	Normalt slitage	Mekaniskt slitage	20	1				
Turbinstyrlager (tätning)	Skador på lagerytor	Vibrationer	25	1				
Turbinstyrlager (vidgning)	Funktionsavvikelse utrustning	Vibrationer	25	1				
Tryckoljesystem – avlastningsventiler	Normalt slitage	Vibrationer	10	2				
Kombinator	Läckage	Trasiga tätningar	5	2	20	5-7	40 (20)	35 (10)
Styrverk	Normalt slitage	Mekanisk beläggning	1	0,0027 3973	1	0,0027 3973	40 (20)	35 (10)

8.7.3 Uppskattningar efter åtgärder, expert 2 och 3.

Komponenter	Skadetyper	Felorsaker	MR L i år	10-perce ntil i år	MRL i år efter renov ering	10-perce ntil i år	MRL i år efter reinve stering	10-percentil i år
Löphjul - skovlar	Normalt slitage	Kavitation	100	87	10	2	100	87
Löphjul – glandring (yttre och inre lagringar)	Läckage	Mekaniskt slitage	5	1	20	5	20	5
Löphjul – nav (invändigt)	Normalt slitage	Mekaniskt slitage, åldring	20	7	30	15	30	15
Löphjul – nav (utvändigt)	Normalt slitage	Kavitation	100	87	30	15	100	80
Turbinaxel -koppling och bultförband	Sprickor	Korrosion	100	87	Skrotas		100	80
Turbinnära vattenvägar – löphjulskammare	Normalt slitage	Kavitation	100	30	100	80	100	80
Ledskovel – övre lagring	Läckage i skovelpackning	Mekaniskt slitage	5	2	30	15	30	15
Pådragscylindrarna	Normalt slitage	Läckage	10	1	20	1	30	15
Packbox	Normalt slitage	Mekaniskt slitage	20	1	10	2	10	2
Turbinstylager (tätning)	Skador på lagerytor	Vibrationer	25	1	20	5	20	5
Turbinstylager (vidgning)	Funktionsavvikelse utrustning	Vibrationer	25	1	5	2	10	1
Tryckoljesystem – avlastningsventiler	Normalt slitage	Vibrationer	10	2	10	1	30	15
Kombinator	Läckage	Trasiga tätningar	5	2				
Styrverk	Normalt slitage	Mekanisk beläggning	1	0,0027 3973				

8.7.4 Uppskattningar efter åtgärder, expert 4.

Komponenter	Skadetyper	Felorsaker	MR L i år	10-perce ntil i år	MRL i år efter renovering	10-perce ntil i år	MRL i år efter reinvestering	10-perce ntil i år
Löphjul - skovlar	Normalt slitage	Kavitation	100	87	12	8	40	35
Löphjul – glandring (yttre och inre lagringar)	Läckage	Mekaniskt slitage	5	1	25	20	40	35
Löphjul – nav (invändigt)	Normalt slitage	Mekaniskt slitage, åldring	20	7	25	20	40	35
Löphjul – nav (utvändigt)	Normalt slitage	Kavitation	100	87	30	25	60	50
Turbinaxel - koppling och bultförband	Sprickor	Korrosion	100	87	25	20	60	50
Turbinnära vattenvägar – löphjulsammare	Normalt slitage	Kavitation	100	30	25	20	60	50
Ledskovel – övre lagring	Läckage i skovelpackning	Mekaniskt slitage	5	2	25	20	25	20
Pådragscyllindrar na	Normalt slitage	Läckage	10	1	15	10	25	20
Packbox	Normalt slitage	Mekaniskt slitage	20	1	20	1	20	15
Turbinstyrlager (tätning)	Skador på lagerytor	Vibrationer	25	1	20	18	40	30
Turbinstyrlager (vidgning)	Funktionsavvikelse utrustning	Vibrationer	25	1	20	18	40	30
Tryckoljesystem – avlastningsventiler	Normalt slitage	Vibrationer	10	2	10	2	25	15
Kombinator	Läckage	Trasiga tätningar	5	2	20	15	30	25
Styrverk	Normalt slitage	Mekanisk beläggning	1	0,0027 3973	10	5	30	25