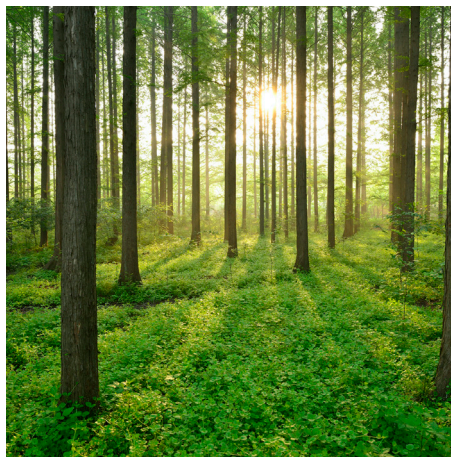


EKONOMISK SIMULERING AV EFFEKTERNA AV BESLUT KRING UNDERHÅLL OCH INVESTERINGAR I ELKRAFTNÄTET

RAPPORT 2025:1120



ELNÄTENS HÅLLBARA
TEKNIKUTVECKLING OCH
DIGITALISERING



Ekonomisk stimulering av effekterna av beslut kring underhåll och investeringar i elnätet

**MAGNUS LINDSTRÖM
GRIDDIAGNOZE AB**

ISBN 978-91-89918-21-4 | © Energiforsk juni 2025

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

Förord

Projektet *Ekonomisk simulering av effekterna kring underhåll och investeringar* ingår i programmet Elnätens hållbara teknikutveckling och digitalisering. Projektet har studerat en ekonomisk simulering av effekterna av beslut kring underhåll och investeringar i elkraftnät, med fokus på tillämpningen av Reliability-Centered Maintenance (RCM).

Syftet är att analysera hur underhållsstrategier kan optimeras för att minska kostnader, förbättra driftsäkerheten och förlänga livslängden på komponenter. Magnus Lindström på GridDiagnoze har ansvarat för projektet. Tack till referensgruppen bestående av Ulrik Törnqvist och Jon Norman, Västerbergslagens Elnät, Anders Erikmarks, Fimpec och Thomas Björnhager från Smedjebackens Energi Nät.

Stort tack också till programstyrelsen för deras initiativ och stöd:

- Olle Bergström, Jämtkraft Elnät
- Arne Berlin, Vattenfall Eldistribution
- Staffan Bjurulf, Sveriges Ingenjörer (MF)
- Magnus Brodin, Skellefteå Kraft (ordf)
- Josefin Grundius, Ellevio
- Stefan Ivarsson, RISE
- Magnus Lindström, Grid Diagnoze
- Per-Olov Lundqvist, Gävle Energi / Elinorr
- Kalle Mannerback, Jönköping Energi Nät
- Giuseppe Martinelli, Svenska kraftnät
- Tilda Nordin, Mälarenergi Elnät
- Dennis Ossman, Göteborg Energi Elnät
- Johan Ribrant, Nacka Energi
- Göran Sandström, Umeå Energi Elnät
- Magnus Sjunnesson, Öresundskraft Elnät
- Peter Silverhjärta, Energiföretagen Sverige
- Claes Wedén, Hitachi Energy Sweden

Följande bolag har deltagit som intressenter till projektet. Energiforsk framför ett stort tack till samtliga för värdefulla insatser.

Ellevio	Karlstads El- och Stadsnät	Dala Energi Elnät
Vattenfall Eldistribution	Borås Elnät	Elektra Nät
Svenska kraftnät	Falu Energi & Vatten	Gävle Energi
Göteborg Energi	Borlänge Energi	Hamra Besparingsskog
Statkraft Sverige	Nacka Energi	Hofors Elverk
Fortum	C4 Energi	Härjeåns Nät
Mälarenergi Elnät	PiteEnergi	Härnösand Elnät
Öresundskraft Elnät	Trollhättan Energi Elnät	Ljusdal Elnät
Tekniska Verken i	Skövde Energi	Malungs Elnät
Linköping	Hitachi Energy Sweden	Sandviken Energi Nät
Skellefteå Kraft Elnät	Energiföretagen Sverige	Sundsvall Elnät
Umeå Energi Elnät	Sveriges Ingenjörer, MF	Söderhamn Elnät
Jämtkraft Elnät	GridDiagnoze	Åsele Elnät
Jönköping Energi Nät	Elinorr ekonomisk förening;	Årsunda Kraft & Belysningsf
Eskilstuna Strängnäs	Bergs Tingslags Elektriska	och
Energi & Miljö	Blåsjön Nät	Övik Energi Nät

Stockholm, maj 2025

Susanne Stjernfeldt, Energiforsk

Här redovisas resultat och slutsatser från ett projekt inom ett forskningsprogram som drivs av Energiforsk. Det är rapportförfattaren/-författarna som ansvarar för innehållet.

Sammanfattning

Denna rapport presenterar en ekonomisk simulering av effekterna av beslut kring underhåll och investeringar i elkraftnät, med fokus på tillämpningen av Reliability-Centered Maintenance (RCM).

Syftet är att analysera hur underhållsstrategier kan optimeras för att minska kostnader, förbättra driftsäkerheten och förlänga livslängden på kritiska komponenter.

Traditionellt schemalagt underhåll jämförs med RCM-baserade metoder genom olika simuleringar, där aspekter såsom budgetfördelning, arbetsmängd och tekniskt baserade underhållsintervall utvärderas. Resultaten visar att en övergång till RCM kan leda till effektivare resursutnyttjande och förbättrad tillförlitlighet för elnätbolagen.

Nyckelord

Reliability-Centered Maintenance (RCM), datadrivna beslut för underhåll och investeringar. Datainsamling samt effektivt resursutnyttjande.

Summary

This report presents an economic simulation of the effects of decisions related to maintenance and investments in the power grid, with a focus on the application of Reliability-Centered Maintenance (RCM). The purpose is to analyse how maintenance strategies can be optimized to reduce costs, improve operational reliability, and extend the lifespan of critical components.

Traditionally scheduled maintenance is compared with RCM-based methods through various simulations, where aspects such as budget allocation, workload, and technically based maintenance intervals are evaluated. The results show that a transition to RCM can lead to more efficient resource utilization and improved reliability for power grid companies.

Innehåll

1	Bakgrund	9
1.1	Introduktion till problemet	9
1.2	Utmaningar med schemalagt underhåll	9
1.3	Vad är "Reliable centered maintenance" RCM	9
1.4	Fördelar med RCM för elnätsbolag	10
1.5	Teknikens roll i implementeringen av RCM	10
2	Studerade scenarion	11
2.1	Utgångsläge: Jämn arbetsmängd och underhållsbudget	11
2.2	Underhållsintervall baserat på tekniskt status	11
2.3	Optimera livslängden och underhållet	11
3	Metodik	12
3.1	Beräkning av sannolikhet för fel eller haveri	12
3.1.1	Bedömningsfaktorer	13
3.2	Riskberäkning	14
3.3	fördelning till underhållsintervall	14
3.4	Metod för simulering	15
4	Fallstudie: Västerbergslagens Elnät	16
4.1	Bakgrundsuppgifter VB Elnät	16
4.2	Beräkningsresultat för VB Elnät	16
4.3	Simulering: Jämn arbetsmängd och underhållsbudget (3.1)	19
4.4	Simulering: Underhållsintervall baserat på tekniskt status (3.2)	20
4.5	optimera livslängden och underhållet	22
4.6	Effekter av Förebyggande Underhåll och Samhällsnytta	22
4.7	Jämn arbetsmängd	23
4.8	Online övervakning för brytare och transformatorer	23
4.9	Sammanställning av Simuleringsresultat och analys	24
5	Referensgrupp i projektet	26
5.1.1	Referensgrupp och samverkan med branschexperter	26
6	Sammanfattning	27
6.1	reflektion	27
7	Referenslista	29

1 Bakgrund

1.1 INTRODUKTION TILL PROBLEMET

Elnätsbolag står inför en växande utmaning att upprätthålla driftsäkerhet och minska kostnader i en tid av ökande krav på elnätens tillförlitlighet och hållbarhet. Traditionella underhållsstrategier, som att genomföra schemalagt underhåll var femte år, kan vara ineffektiva och leda till både onödiga kostnader och ökade risker. Ett alternativ är att använda Reliability-Centered Maintenance (RCM), en metod som baseras på en systematisk analys av komponenternas tillstånd och kriticitet för att optimera underhållsprocesserna.

1.2 UTMANINGAR MED SCHEMALAGT UNDERHÅLL

Schemalagt underhåll har länge varit standardpraxis i många elnätbolag. Även om metoden är enkel att planera och genomföra, har den flera inneboende svagheter:

- **Överunderhåll:** Vissa komponenter underhålls trots att de är i gott skick, vilket resulterar i onödiga kostnader och kan i vissa fall leda till onödiga haverier.
- **Bristande anpassning till driftsförhållanden:** Schemalagt underhåll tar inte hänsyn till variationer i komponenternas ålder, belastning och miljöförhållanden.

1.3 VAD ÄR "RELIABLE CENTERED MAINTENANCE" RCM

Reliability-Centered Maintenance är en metodik som utvecklades för att maximera systemtillgänglighet och minimera underhållskostnader. RCM kombinerar data om tillståndsovervakning, felhistorik och riskbedömning för att identifiera vilka underhållsåtgärder som är nödvändiga och när de ska utföras. Metoden fokuserar på att prioritera underhåll för de komponenter vars fel skulle få de som motsvarar de största riskerna, när sannolikheten för fel och felens konsekvenser vägs samman.

1.4 FÖRDELAR MED RCM FÖR ELNÄTSBOLAG

1. **Ökad driftsäkerhet:** Genom att basera underhåll på faktisk komponentstatus minskas risken för oväntade fel.
2. **Optimerade kostnader:** RCM minskar resursslöseri genom att fokusera på rätt åtgärder vid rätt tidpunkt.
3. **Förlängd livslängd på utrustning:** Förebyggande åtgärder kan förhindra accelererad slitage och öka livslängden på nyckelkomponenter.
4. **Bättre efterlevnad av regulatoriska krav:** RCM kan hjälpa elnätbolag att uppfylla krav på dokumentation och säkerhet.
5. **Flexibilitet och anpassning:** RCM möjliggör snabbare anpassning till förändrade driftförhållanden eller nya tekniska framsteg.

1.5 TEKNIKENS ROLL I IMPLEMENTERINGEN AV RCM

Moderna teknologier möjliggör effektiv datainsamling och analys i realtid. Denna information är avgörande för att RCM ska kunna implementeras framgångsrikt. Genom att kombinera avancerade sensorer, molnbaserad analys och faktabaserat beslutsfattande kan elnätbolagen optimera sina underhållsstrategier och samtidigt minska driftkostnaderna.

2 Studerade scenarion

För att illustrera effekterna av Reliability-Centered Maintenance (RCM) och dess tillämpning i elnätbolag kommer följande aspekter att simuleras:

2.1 UTGÅNGSLÄGE: JÄMN ARBETSMÄNGD OCH UNDERHÅLLSBUDGET

- **Beskrivning:** Simuleringen utgår från en fast årlig budget för underhåll. Detta ger en realistisk bild av hur RCM kan implementeras utan att öka totala kostnaderna.
- **Syfte:** Att visa hur RCM kan omfördela resurser för att optimera systemprestanda inom en given ekonomisk ram.

2.2 UNDERHÅLLSINTERVALL BASERAT PÅ TEKNISKT STATUS

- **Beskrivning:** Underhållsintervall för varje komponent anpassas efter dess faktiska tekniska tillstånd, vilket bestäms med hjälp av tillståndsovervakning och historiska data.
- **Syfte:** Att demonstrera vilken effekt hur en partiell tillämpning av RCM har på risken för haveri och underhållsbudgeten.

2.3 OPTIMERA LIVSLÄNGDEN OCH UNDERHÅLLET

- **Beskrivning:** RCM-strategierna syftar till att förlänga livslängden för utrustning genom att utföra förebyggande underhåll innan kritiska skador uppstår.
- **Syfte:** Att visa hur en fullständig RCM får för underhållsbudgeten och risken för haveri.

3 Metodik

Vår metodik bygger på två huvudsakliga bedömningsparametrar:

1. **Sannolikhet för fel eller haveri**
 - Varje apparat har utvärderats utifrån tillgängliga data inklusive:
 - Tidigare underhållsrapporter
 - Inspektion av apparater
 - Analys av olje- och gasprover
 - Trend gstryck i brytare
 - Trend av batterispänning, batteriström
2. **Konsekvensbedömning**
 - Varje fack i stationen har bedömts utifrån:
 - Vilken inverkan ett fel skulle ha på industriell verksamhet
 - Vilken påverkan ett fel skulle ha på samhället, inklusive risker för strömavbrott, ekonomiska förluster och säkerhetsrisker

3.1 BERÄKNING AV SANNOLIKHET FÖR FEL ELLER HAVERI

I denna metodik för tillståndsbedömning av elektriska anläggningar beräknas sannolikheten för fel eller haveri utifrån en sammansatt modell bestående av fem centrala parametrar:

Utrustningens ålder och design – tar hänsyn till komponentens tekniska livscykel och konstruktionsmässiga robusthet.

Ronderingshistorik – bygger på dokumenterade resultat från fältinspektioner och visuell kontroll.

Diagnostiska data – omfattar mätvärden och analyser från tillståndsövervakning såsom gasanalys, termografering och batteriövervakning.

Underhållshistorik – inkluderar frekvens, typ och kvalitet på genomförda underhållsåtgärder.

Miljökonsekvens – avser påverkan från externa faktorer såsom klimatförhållanden, föroreningar och anläggningens fysiska placering.

Varje parameter viktas utifrån dess relativa betydelse för anläggningens funktionssäkerhet.

För varje parameter poängsätts tillgängliga data. Kombinerar med respektive parameters viktningsfaktor för att generera ett

sammanvägt sannolikhetsvärde. Detta värde anger sannolikheten att en komponent eller anläggning drabbas av ett fel eller haveri inom en angiven tidsperiod.

Metoden för att beräkna konsekvensen av ett fel eller haveri på transformatorstationer och ställverk. Beräkningen bygger på en systematisk bedömning av flera faktorer som sammantaget avgör konsekvensens allvarlighetsgrad. Metoden tar hänsyn till fem centrala faktorer som bedöms på både stationsnivå och facknivå.

3.1.1 Bedömningsfaktorer

För att skapa en heltäckande konsekvensbedömning värderas följande faktorer:

1. **Typ av nät**
 - Detta avser vilken typ av elnät som stationen är en del av (t.ex. regionnät, lokalnät eller industrianläggning). Ett regionnät kan till exempel ha större samhällspåverkan vid ett avbrott än ett lokalnät.
2. **Funktion**
 - Stationens roll i elnätet bedöms. Detta inkluderar dess betydelse för eldistribution, kritiska kunder och dess placering i nätet. En station som försörjer samhällsviktiga funktioner (t.ex. sjukhus eller industrier) kommer att ha en högre konsekvens vid avbrott.
3. **Ställverkslösning - Tillgänglighet**
 - Bedömning av tillgängligheten till ställverket, inklusive fysiska faktorer som kan begränsa insatser vid underhåll och reparationer. Begränsad tillgänglighet kan långa driftstörningar och förvärra konsekvenserna.
4. **Ställverkslösning - Tillförlitlighet**
 - Tillförlitlighet bedöms utifrån anpassade standarder för apparater och teknisk design. En station med hög tillförlitlighet har en minskad risk för haveri, vilket reducerar potentiella konsekvenser.
5. **Ekonomisk påverkan vid avbrott**
 - Den ekonomiska förlusten som ett avbrott kan medföra beräknas utifrån faktorer som elbortfall, produktionsstörningar och samhällspåverkan.

Varje faktor bedöms enligt en poängskala där högre poäng motsvarar större konsekvens. Poängen viktas utifrån deras respektive betydelse och summeras till ett slutligt konsekvensvärde.

**Konsekvensvärde = (Typ av nät × Viktning 1) + (Funktion × Viktning 2)
+ (Tillgänglighet × Viktning 3) + (Tillförlitlighet × Viktning 4) +
(Ekonomisk påverkan × Viktning 5)**

Viktningen utgår från en omfattande erfarenhetsbas som Griddiagnoze byggt upp och som omfattas av konfidentialitet.

3.2 RISKBERÄKNING

Riskberäkning per enhet

Varje apparat i nätet analyserades utifrån sannolikheten för fel (P) och konsekvensen vid fel (C), enligt modellen:

$$\text{Risk}^2 = P^2 \times C^2$$

3.3 FÖRDELNING TILL UNDERHÅLLSINTERVALL

För denna beräkning har en grov kategoriindelning av apparaternas underhållsintervall gjorts.

Hög risk: 3–5 år

Medelhög risk: 6–10 år

Låg risk: 11–15 år

Komponenter som till exempel vakuumbrytare och lindningskopplare med mycket låg sannolikhet för fel enligt tillverkare har satts till ett 10–15 årsintervall. För vissa vakuum-lindningskopplare anges från tillverkaren att inget underhåll krävs; dessa har dock av försiktighetsskäl tilldelats ett 10-årigt intervall.

Sammanhållning av underhåll inom stationer

För att minimera resursanvändning och stillestånd samplaneras underhållsinsatser per station. Komponenter inom samma station som tillhör samma intervallgrupp samordnas så långt det är möjligt, vilket minskar antalet insatser och optimerar logistik.

Beräkning av resursbehov

Baserat på varje komponents uppskattade arbetstid vid underhåll ("working hours") har den genomsnittliga arbetstiden per station och per underhållsintervall beräknats. Detta ger underlag för framtida bemannings- och kostnadsplanering.

3.4 METOD FÖR SIMULERING

Datainsamling och analys

- Insamling av historiska data om felstatistik, underhållskostnader och livslängd för komponenter.
- Bedömning av tekniskt status för kritiska komponenter.

Utformning av RCM-strategier

- Identifiering av kritiska komponenter och deras potentiella felmekanismer.
- Optimering av underhållsplaner baserade på sannolikhet för fel och konsekvensbedömning.

Simuleringsscenarier

- Jämförelse av RCM-baserade underhållsstrategier med schemalagt underhåll var femte år.
- Simulering av ekonomiska och operativa effekter av olika underhållsintervall.

4 Fallstudie: Västerbergslagens Elnät

4.1 BAKGRUNDSUPPGIFTER VB ELNÄT

Västerbergslagens Elnät förvaltar cirka 300 truckbrytare, 30 transformatorer med lindningskopplare samt 60 högspänningsbrytare. Underhållet av dessa 390 apparater utförs enligt ett femårigt underhållsintervall. Frånskiljare ingår också i deras underhållsprogram, men dessa ingår inte i detta specifika projekt. Vi har använt EBRs kostnadskatalog för underhållskostnader i våra simuleringar. Enligt denna blir underhållsbudgeten 480 000 SEK/år, vilket ligger väl i linje med VB Elnäts faktiska underhållskostnad.

4.2 BERÄKNINGSRESULTAT FÖR VB ELNÄT

Med hjälp av insamlade data om dessa 390 apparater, i kombination med en konsekvensgradering, har vi nu möjlighet att differentiera underhållsinsatser enligt metoden Reliability-Centered Maintenance (RCM).

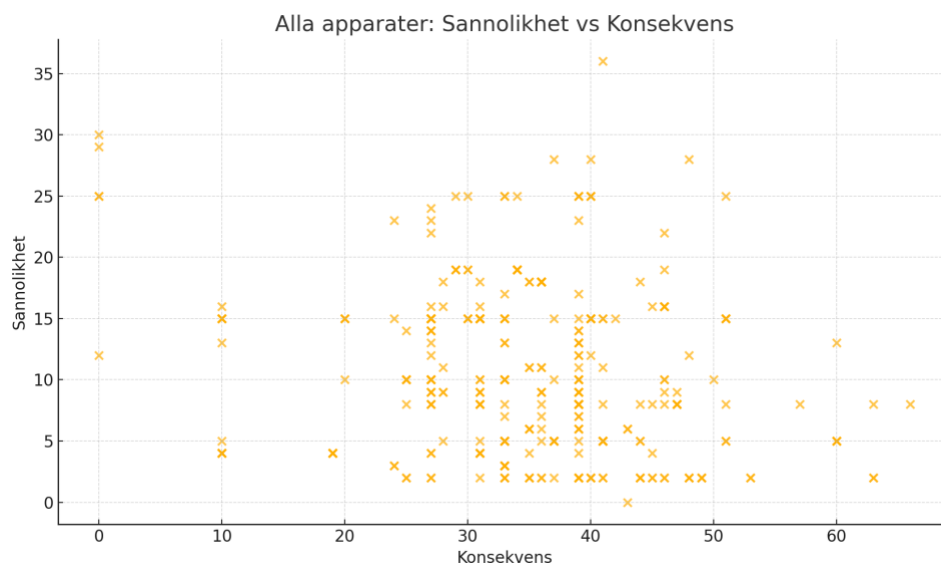
Processen har varit att samla in data för alla 390 apparater och beräknat sannolikhet och konsekvens enligt 5.1, 5.2 och 5.3.

För samtliga 390 apparater motsvarar det 10 datapunkter för konsekvens och för sannolikhet 30 dataparametrar per apparat. Vilket totalt ca 16 000 datapunkter.

Alla simuleringar har utförts i excel med att sprida ut enheterna i en 15 årsperiod där de olika underhållsintervallerna delas upp. Kostnader för underhåll beräknas per år. Sedan har vi tagit ett medel för en 5 årsperiod för att kunna jämföra med det periodiska 5 års underhållet.

Intervall	År	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
3	Brytare	4	5	4	4	5	4	4	5	4	4	5	4	4	5	5
	Lindningskopplare															
	Truckbrytare			1			1			1			1			1
4	Brytare				1				1				1			
	Lindningskopplare															
	Truckbrytare															
5	Brytare	4	4	4	4	2	4	4	4	4	2	4	4	4	4	2
	Lindningskopplare	4	4	4	4	3	4	4	4	4	3	4	4	4	4	3
	Truckbrytare	27	27	27	29	27	27	27	27	29	27	27	27	27	29	27
6	Brytare															
	Lindningskopplare															
	Truckbrytare															
7	Brytare	8	8	8	8	10	8	8	8	8	8	10	8	8	8	8
	Lindningskopplare	3	3	3	2	2	2	2	3	3	3	2	2	2	2	3
	Truckbrytare	1	1	1	2	2	2	2	1	1	1	2	2	2	2	2
8	Brytare	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	Lindningskopplare					0										
	Truckbrytare															
10	Brytare	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Lindningskopplare	2	2	2	1							2	2	2	1	0
	Truckbrytare			1		0										
15	Brytare	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Lindningskopplare															
	Truckbrytare	0	0													
Brytare		141 947 kr	152 866 kr	141 947 kr	131 028 kr	120 109 kr	131 028 kr	131 028 kr	152 866 kr	141 947 kr	120 109 kr	141 947 kr	131 028 kr	131 028 kr	141 947 kr	131 028 kr
Lindningskopplare		145 656 kr	124 848 kr	124 848 kr	124 848 kr	62 424 kr	83 232 kr	83 232 kr	124 848 kr	83 232 kr	62 424 kr	124 848 kr	145 656 kr	124 848 kr	104 040 kr	62 424 kr
Truckbrytare		134 850 kr	134 850 kr	144 150 kr	144 150 kr	195 300 kr	186 000 kr	181 350 kr	186 000 kr	148 800 kr	134 850 kr	134 850 kr	153 450 kr	134 850 kr	144 150 kr	139 500 kr
Totalt		422 453 kr	412 564 kr	410 945 kr	400 026 kr	377 833 kr	400 260 kr	395 610 kr	463 714 kr	373 979 kr	317 383 kr	401 645 kr	430 134 kr	390 726 kr	390 137 kr	332 952 kr

Så här ser anläggningen ut efter att vi beräknat sannolikhet och konsekvens:

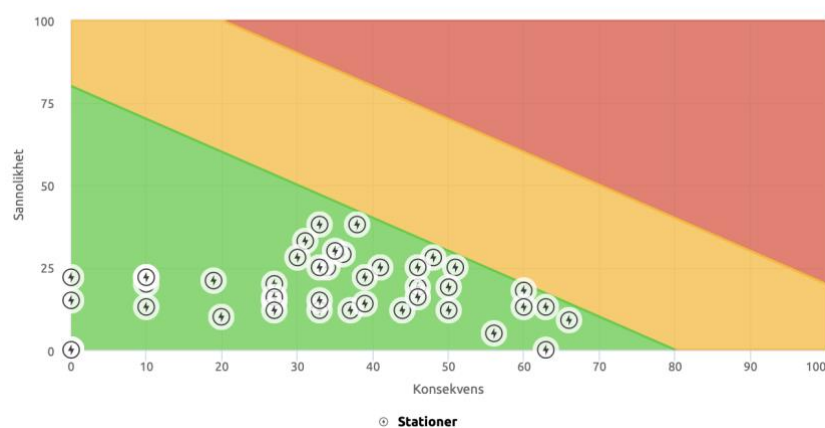


Det går att vara mer konservativ eller mer vågad att sprida ut underhållsintervallet efter risken.

Stationer med sannolikhet och konsekvens på aggregerad nivå. Exempel på stationernas sannolikhet och konsekvens.

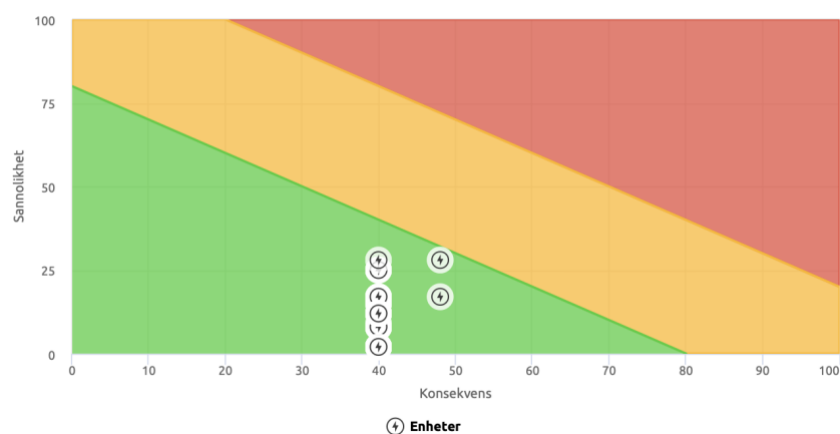
STATIONER - EWI

42 0 0

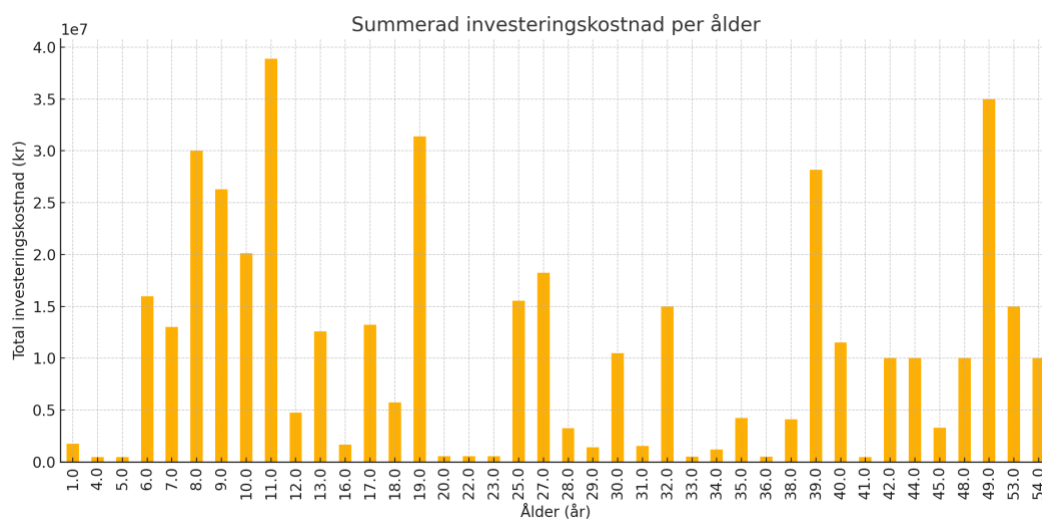


Apparater med olika konsekvens per fack. Detta ett exempel på en station hur apparaterna fördelas med olika konsekvens per fack.

ENHETER – EWI



Vi har också sammanställt apparaternas ålder och nyinvesteringskostnader.

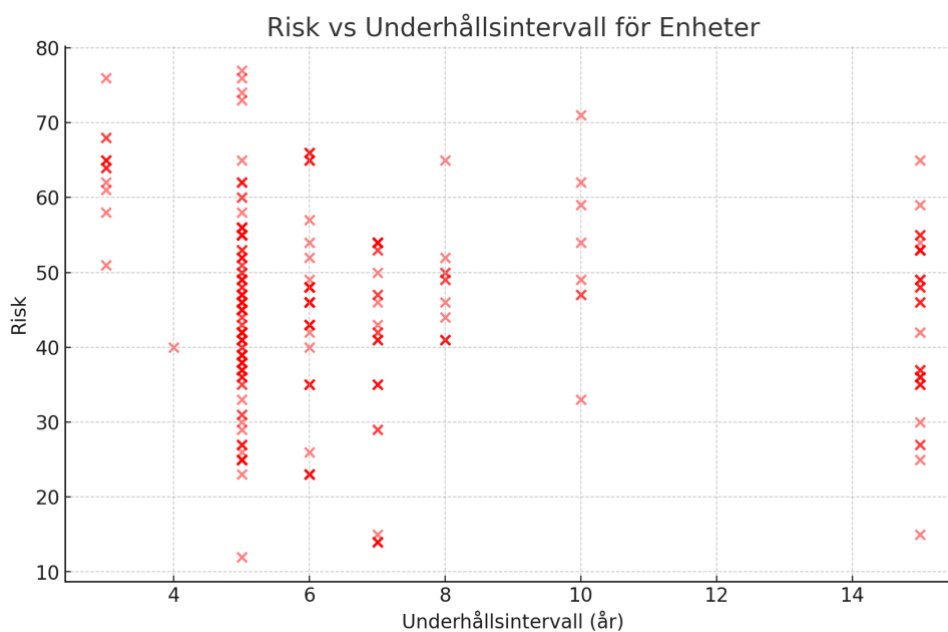


4.3 SIMULERING: JÄMN ARBETSMÄNGD OCH UNDERHÅLLSBUDGET (3.1)

Syftet med denna simulering var att undersöka hur en underhållsbudget kan fördelas optimalt genom att använda RCM metoden.

Underhållsintervallet har fördelats efter tidigare beskriven metod.

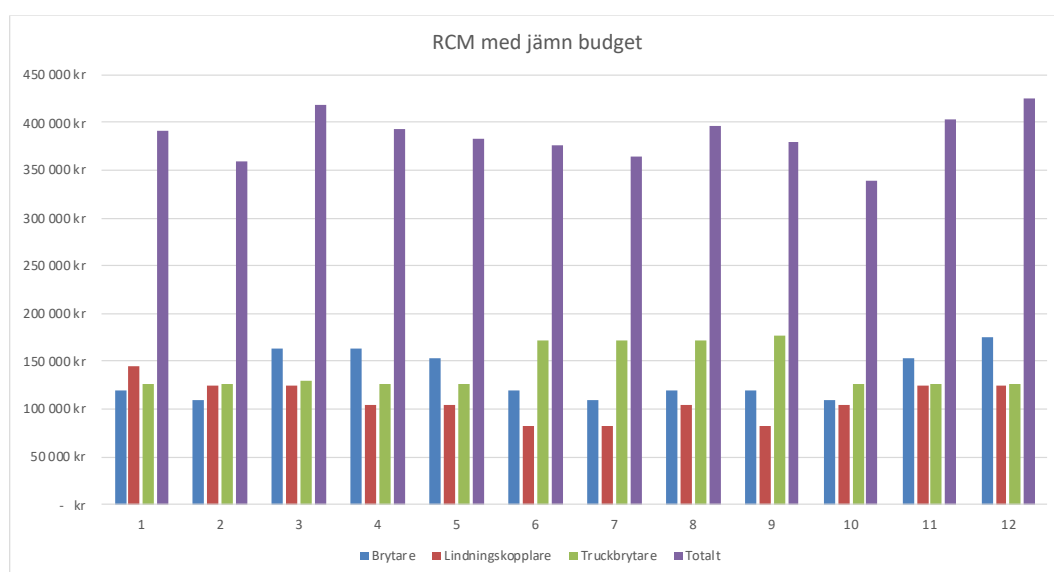
Nedan bild visar risk vs underhållsintervall för alla enheter. Notera att några enheter ligger på 3 år. De har både hög sannolikhet för fel och hög konsekvens.



Om man jämför med att ha 5 årsintervall på alla enheter så var kostnaden 480 000 SEK/år.

Nedan simulering visar att det går att komma ner till ett snitt på 385 000 SEK/år.

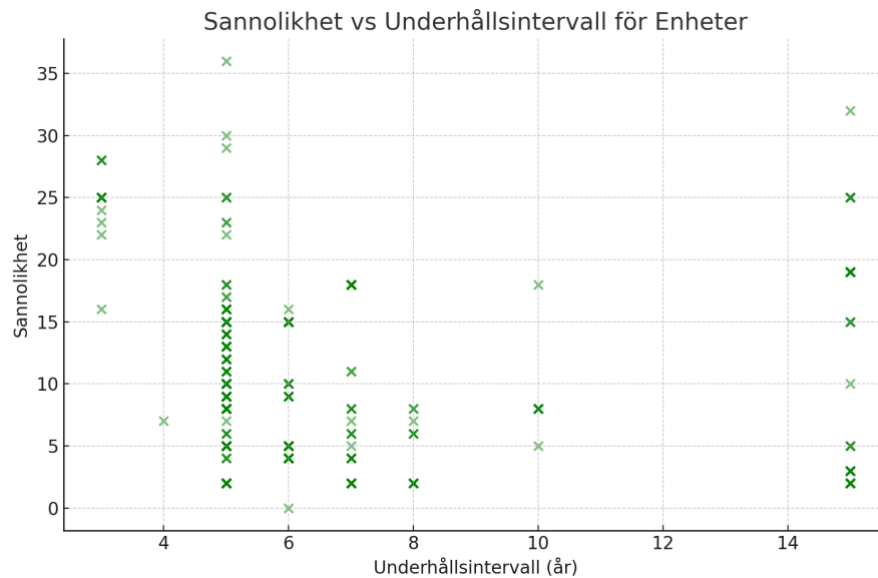
Vissa variationer över de olika åren är svårt att undvika då man vill hålla ihop stationers apparater. Tex alla truckbrytare på en station.



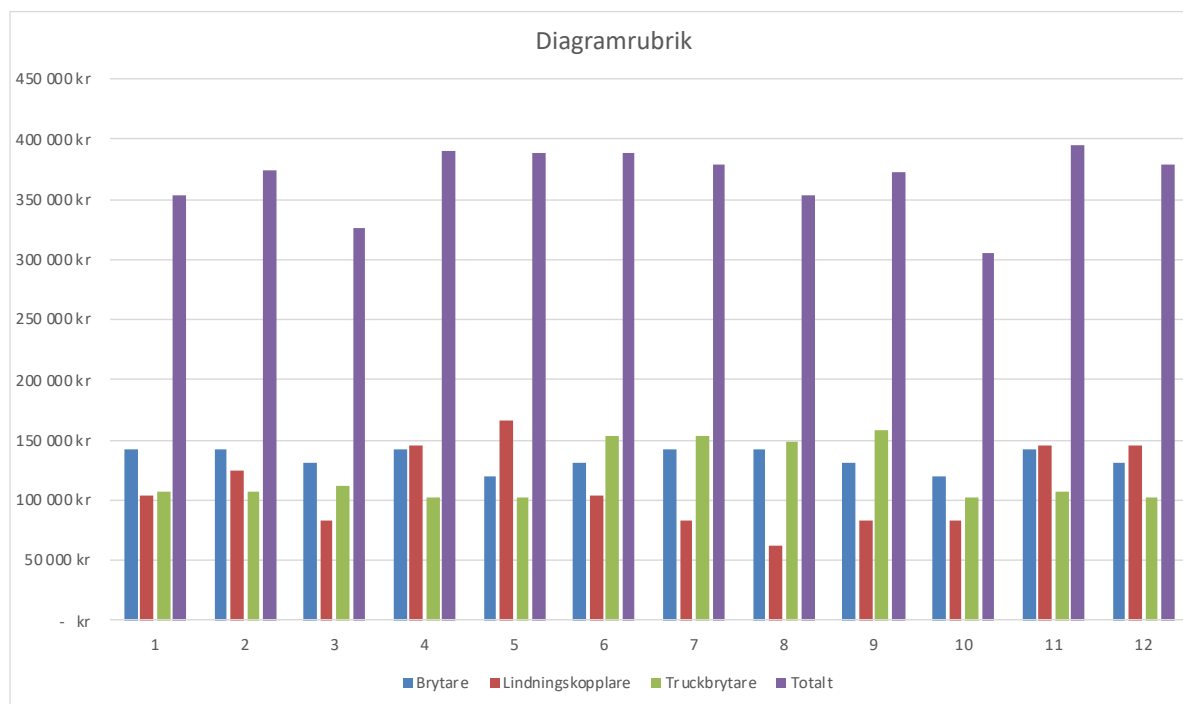
4.4 SIMULERING: UNDERHÅLLSINTERVALL BASERAT PÅ TEKNISKT STATUS (3.2)

Denna simulering visar anpassade underhållsintervall, sannolikheten eller den faktiska tekniska statusen.

I denna metod så väger man inte in konsekvensen i antagandet, detta kan innebära att man inte tar hänsyn till apparater som är nyckelkomponenter i nätet.



Vi har valt att vara konservativa men där tillverkaren säger att apparaterna är underhållsfria så har vi ändå lagt dem på 10 eller 15 år. Om man jämför med att ha 5 årsintervall på alla enheter så var kostnaden 480 000 SEK/år. Med denna simulering visar att det går att komma ner till ett snitt på 366 000 SEK/år. Men med större variationer.



4.5 OPTIMERA LIVSLÄNGDEN OCH UNDERHÅLLET

Att optimera livslängden för apparater är svårt att bevisa men det finns studier som visar att om man gör underhåll mer frekvent än nödvändigt så ökar risken för haveri.

Många forskningsrapporter inom Reliability-Centered Maintenance (RCM) och Condition-Based Maintenance (CBM) stödjer det påståendet. Orsaken till det är att varje ingrepp på en komponent innebär en risk för införda fel (eng: "infant mortality" eller "human error").

4.6 EFFEKTER AV FÖREBYGGANDE UNDERHÅLL OCH SAMHÄLLSNYTTA

Genom att implementera förebyggande åtgärder innan kritiska skador uppstår kan man visa på att livslängden på nyckelkomponenter förlängs. Detta kommer resultera i en minskning av kapitalkostnaderna genom att skjuta upp investeringar i ny utrustning.

Förlängd livslängd på komponenter har även betydande samhällsnytta. Genom att minska behovet av frekventa komponentbyten minskar också:

- Energiförbrukningen och klimatpåverkan kopplad till tillverkning och installation av ny utrustning
- Resursförbrukningen i form av råmaterial och produktionskostnader
- Driftstörningar och avbrott som kan påverka kritiska samhällsfunktioner såsom sjukvård, industri och transportsektorn

4.7 JÄMN ARBETSMÄNGD

För att undvika ojämn arbetsbelastning och onödiga resursutmaningar analyserades arbetsfördelningen över tid.

Arbetsmängden är linjär med kostnaden för ett underhåll. Därav så går det att applicera jämn arbetsmängd för både den med teknisk sannolikhet och den beräknade för risk.

4.8 ONLINE ÖVERVAKNING FÖR BRYTARE OCH TRANSFORMATORER

Genom att implementera online övervakning av brytare och transformatorer kan RCM-strategin förstärkas ytterligare. Online övervakning möjliggör kontinuerlig datainsamling och analys av kritiska parametrar såsom temperatur, spänningsvariationer och gstryck. Detta möjliggör tidig identifiering av potentiella fel, vilket gör det möjligt att utföra förebyggande underhåll innan allvarliga skador uppstår. Fördelarna med online övervakning inkluderar:

- **Snabbare felupptäckt:** Minskad risk för oväntade driftstörningar genom realtidsövervakning.
- **Optimerad underhållsplanering:** Möjlighet att utföra underhåll baserat på faktisk komponentstatus istället för fasta intervall.
- **Förlängd livslängd:** Proaktiv hantering av komponenter minskar risken för onödigt slitage.
- **Kostnadsbesparingar:** Effektivare resursfördelning genom bättre prioritering av underhållsinsatser.

Online övervakning ger därmed elnätbolagen en ännu mer datadriven och precis strategi för att maximera tillförlitlighet och kostnadseffektivitet.

4.9 SAMMANSTÄLLNING AV SIMULERINGSRESULTAT OCH ANALYS

Simuleringarna bekräftar att RCM är en kraftfull metod för att optimera underhållsstrategier i elkraftnät. Jämfört med traditionella schemalagda metoder ger RCM en mer kostnadseffektiv och driftsäker lösning. Resultaten pekar på att elnätbolag som implementerar RCM kan minska sina underhållskostnader, förbättra nätets tillförlitlighet och skapa en mer hållbar arbetsfördelning. Denna rapport ger en grundläggande vägledning för elnätbolag som vill övergå från schemalagt underhåll till en mer datadriven och behovsanpassad strategi.

Nedanstående tabell visar hur spridningen av intervallet blev efter fördelningen. Oavsett om det är brytare, truckbrytare eller lindningskopplare.

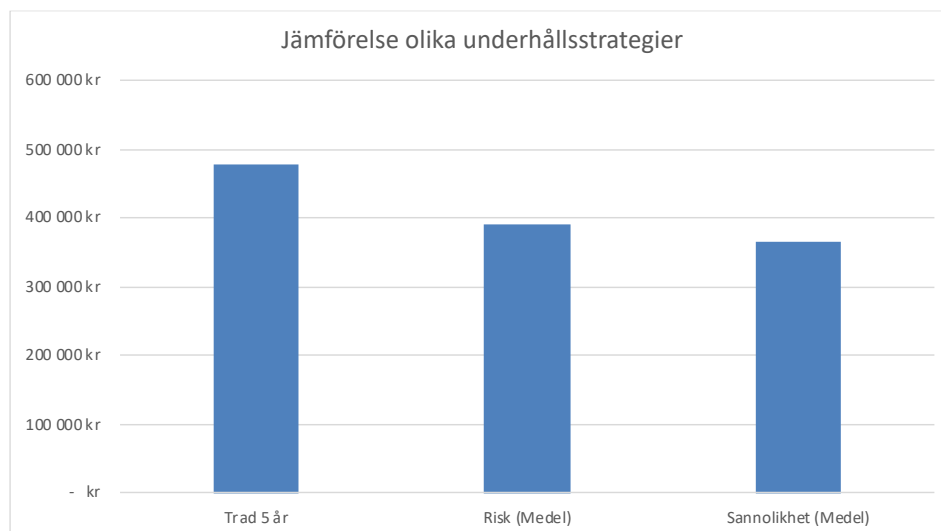
Nedanstående tabell visar fördelningen med riskmetoden.

Intervall år	Procentandel
3–4	5 %
5	52%
6	15%
7	11%
8	3%
10	2%
15	12%

52% fick ligga kvar på 5 år, där finns det utrymme för att ytterligare öka intervallet.

Första stapeln visar 5års intervall på alla apparater med en underhållskostnad på 480 000 SEK/år.

Nedanstående bild visar en jämförelse för traditionellt underhåll med intervall på 5 år. Mittenstapeln är med riskbaserat intervall 386 000 SEK/år och sista är om man utgår från teknisk status utan konsekvens 366 000 SEK/år.



Sammanställning

Traditionellt underhåll intervall 5 år	478 193 kr	
Riskfördelning (Medel)	385 735 kr	81%
Konditionsbaserat intervall (Medel)	365 197 kr	76%

I denna simulering får vi 19% lägre underhållskostnad per år om man går över till att använda RCM metoden. 24% lägra om man inte tar in konsekvensen utan teknisk status.

Konditionsbaserat underhåll är en jämförelse om man inte tar konsekvensen i beräkning utan bara konditionen för apparaten. Denna metod ger att man tar en större risk och inte tar in konsekvensen för ett haveri.

5 Referensgrupp i projektet

5.1.1 Referensgrupp och samverkan med branschexperter

I arbetet med att utveckla vår metodik för statusbedömning av transformatorstationer och ställverk har vi samverkat med en referensgrupp bestående av representanter från olika aktörer inom energibranschen. Referensgruppen har haft en central roll i att kvalitetssäkra våra metoder, validera resultat samt ge värdefull input kring praktiska tillämpningar och branschspecifika behov.

Deltagare i referensgruppen:

- **Västerbergslagens Elnät** – Representerat av Ulrik Törnqvist och Jon Norman, som har bidragit med expertis inom elnätsdrift och underhållsplanering.
- **Fimpec** – Representerat av Anders Erikmats, som har tillfört djupa insikter om teknisk utrustning och komponenters livslängd.
- **Smedjebackens Energi Nät** – Representerat av Thomas Björnhager, som har delat med sig av erfarenheter inom energidistribution och stationstjänster.

Referensgruppens insatser har säkerställt att vår metodik bygger på beprövade arbetssätt samtidigt som den anpassas efter aktuella branschstandarder och praktiska utmaningar. Gruppen har även gett värdefull feedback kring viktiga aspekter av budgetarbete, såsom kostnadsoptimering, prioritering av underhållsåtgärder och strategisk planering av resurser. Denna input har varit avgörande för att skapa en metodik som är både effektiv och ekonomiskt hållbar.

Deltagarnas breda erfarenhet har varit avgörande för att utveckla en tillförlitlig och användbar modell för att bedöma sannolikheten för fel samt konsekvenserna av dessa på industri och samhälle.

Vi vill rikta ett stort tack till referensgruppens medlemmar för deras engagemang och värdefulla bidrag i projektet.

6 Sammanfattning

Simuleringarna visar att RCM (Reliability-Centered Maintenance) är en effektiv metod för att optimera underhållsstrategier inom elkraftnät. Jämfört med traditionellt schemalagt underhåll leder RCM till både lägre kostnader och högre driftsäkerhet. Genom att anpassa underhållet efter faktisk risk och teknisk status kan elnätsbolag minska sina årliga underhållskostnader med upp till 24 %.

En fördelningsanalys visar att 52 % av apparaterna behåller ett 5-årsintervall, men det finns möjlighet att förlänga detta ytterligare. En jämförelse mellan olika strategier visar följande genomsnittliga årliga kostnader:

- **Traditionellt underhåll (5 år):** 478 193 kr
- **Riskbaserat underhåll:** 385 735 kr (-19 %)
- **Konditionsbaserat utan konsekvensbedömning:** 365 197 kr (-24 %)

Den konditionsbaserade metoden innebär dock att man bortser från konsekvenser vid fel, vilket innebär högre risk.

Sammanfattningsvis erbjuder RCM ett mer kostnadseffektivt, driftsäkert och hållbart alternativ till traditionellt underhåll, med potential för bättre resursfördelning i underhållsarbetet.

6.1 REFLEKTION

Reglermodellen för elnätsbolag, som övervakas av Energimarknadsinspektionen (Ei), syftar till att säkerställa effektiva investeringar och rimliga avgifter för konsumenterna. Den nuvarande modellen baseras på intäktsramar där elnätsföretagens tillåtna intäkter beräknas utifrån deras kapitalbas och en föreskriven avkastningsränta. Detta system kan dock skapa incitament som inte alltid främjar riskbaserat underhåll.

Riskbaserat underhåll innebär att underhållsåtgärder planeras och genomförs baserat på en bedömning av anläggningens skick och den potentiella risken för fel. Den nuvarande regleringen tenderar att fokusera på kostnadseffektivitet och kortsiktiga ekonomiska mål, vilket kan leda till att elnätsföretag prioriterar akuta reparationer framför proaktiva

underhållsinsatser. Detta kan i sin tur öka risken för oplanerade avbrott och högre kostnader på lång sikt.

Enligt rapporten "Reglering av el- och gasnätsverksamhet" (Ei R2022:01) från Ei, finns det en medvetenhet om att nuvarande regleringsmodell kan ha begränsningar när det gäller att främja långsiktigt hållbart underhåll. Rapporten pekar på behovet av att utveckla regleringsmodellen för att bättre stödja investeringar i underhåll och förnyelse av nätinfrastrukturen.

Att inte integrera riskbaserat underhåll i regleringsmodellen kan leda till ett ohållbart ägande av elnätsanläggningar. Utan incitament för proaktivt underhåll kan anläggningarnas tillförlitlighet och livslängd minska, vilket påverkar både leveranskvaliteten och ekonomin negativt. Det är därför viktigt att regleringsmodellen utvecklas för att inkludera mekanismer som främjar riskbaserat underhåll och därigenom säkerställer ett hållbart och ansvarsfullt ägande av elnätsinfrastrukturen.

7 Referenslista

L. Bertling Tjernberg, (2023). Reliability-Centered Asset Management with Models for Maintenance Optimization and Predictive Maintenance: Including Case Studies for Wind Turbines In J. Tietjen, M. D. Ilic, L. Bertling Tjernberg, N. N. Schulz (Eds.), *Women in Power Research and Development Advances in Electric Power Systems*. (pp. 87-155) Springer Cham, DOI <https://doi.org/10.1007/978-3-031-29724-3> July 2023.

Bertling Tjernberg, L. (2002). *Infrastructure Asset Management with Power System Applications* (Doctoral dissertation, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden).

Pwc (Oslo 25 februari 2013). *God praksis i nettselskapenes anleggsforvaltning* Energi Norge.

EBR kostnadskatalog 2022

CIGRÉ TB 761: "Asset Management Decision-Making Using Risk-Based Approaches" (2019)

"Risk-based and condition-based strategies outperform time-based schedules in both cost-efficiency and risk mitigation."

EKONOMISK SIMULERING AV EFFEKTERNA AV BESLUT KRING UNDERHÅLL OCH INVESTERINGAR I ELKRAFTNÄTET

Dokumentet presenterar en ekonomisk simulering av effekterna av beslut kring underhåll och investeringar i elkraftnät, med fokus på tillämpningen av Reliability-Centered Maintenance (RCM). Syftet är att analysera hur underhållsstrategier kan optimeras för att minska kostnader, förbättra driftsäkerheten och förlänga livslängden på kritiska komponenter. Traditionellt schemalagt underhåll jämförs med RCM-baserade metoder genom olika simuleringar, där aspekter såsom budgetfördelning, arbetsmängd och tekniskt baserade underhållsintervall utvärderas.

Rapporten innehåller också en detaljerad metodik för att beräkna sannolikheten för fel eller haveri och konsekvensen av dessa. Den beskriver hur moderna teknologier kan användas för att implementera RCM framgångsrikt, inklusive online övervakning av brytare och transformatorer. Simuleringarna bekräftar att RCM är en kraftfull metod för att optimera underhållsstrategier i elkraftnät, vilket kan leda till lägre kostnader och högre driftsäkerhet.

Genom att anpassa underhållet efter faktisk risk och teknisk status kan elnätsbolag minska sina årliga underhållskostnader med upp till 24 %.

Ett nytt steg i energiforskningen

Forskningsföretaget Energiforsk initierar, samordnar och bedriver forskning och analys inom energiområdet samt sprider kunskap för att bidra till ett robust och hållbart energisystem. Energiforsk är ett politiskt neutralt och icke vinstutdelande aktiebolag som ägs av branschorganisationerna Energiföretagen Sverige och Energigas Sverige, det statliga affärsverket Svenska kraftnät, samt gas- och energiföretaget Nordion Energi. Läs mer på energiforsk.se.

