

Risikobasert vedlikeholdsplanlegging og fornyelsesstrategi for høyspente luftlinjer i distribusjonsnett

Gunstein Augland
Nicolai Thorsen Staurvik

Veiledere

Tom Lassen (UiA)
Terje Taraldsen (AE Nett)

*Masteroppgaven er gjennomført som ledd i utdanningen ved
Universitetet i Agder og er godkjent som del av denne utdanningen.
Denne godkjenningen innebærer ikke at universitetet innestår for de
metoder som er anvendt og de konklusjoner som er trukket.*

Universitetet i Agder, 2015

Fakultet for teknologi og realfag

Institutt for ingeniørvitenskap

Forord

Denne masteroppgaven er avsluttende oppgave for Industriell Økonomi og Teknologiledelse, ved fakultetet for teknologi og realfag på Universitetet i Agder. Oppgaven vektlegges med 20 studiepoeng og omhandler fornyelsesvurdering av høyspente luftlinjer i distribusjonsnettet til Agder Energi Nett.

Oppgaveforfatterne har tidligere arbeidet sammen i forbindelse med bacheloroppgave som omhandlet aldring, havari, vedlikehold og fornyelse av distribusjonstransformatorer hos Agder Energi Nett. Det var også aktuelt å skrive masteroppgave for selskapet, og etter samtaler med ekstern veileder Terje Taraldsen ble problemstilling og hovedmål utarbeidet.

Oppgaven er utarbeidet med god veiledning og tett kontakt mellom Agder Energi Nett, og internveileder på UiA, Tom Lassen. Jarle Stokke-Olsen, systemansvarlig NetBas vedlikehold hos Agder Energi Nett, har vært en svært viktig konsulent for oppgaven. Vi har gjennom tett kontakt med Stokke-Olsen, på mail og ved besøk, fått verdifull informasjon i forbindelse med digitalisering av tilstandsprosessen. Feilstatistikk-problematikken ble løst med god hjelp fra driftsanalytiker Lars Eirik Nilssen ved Agder Energi Nett.

Det rettes en stor takk til:

- Tom Lassen Professor
- Terje Taraldsen Teknisk sjef
- Syvert Augland Fagansvarlig distribusjonsnett
- Jarle Stokke-Olsen Systemansvarlig NetBas vedlikehold
- Oddbjørn Berg Driftsingeniør
- Lars Eirik Nilssen Rådgiver driftsanalyse
- Kjell Morgan Ose Sivilingeniør (M.Sc.)
- Øyvind Salvesen Driftsingeniør

25. mai 2015
Grimstad

Gunstein Augland

Nicolai Thorsen Staurvik

Sammendrag

I de senere år har nettselskapene blitt presset til mer effektiv drift av nettet. Dette medfører at det stilles strengere krav til systematiske metoder og gode analyser for investering, drift og vedlikehold. Denne rapporten ser på mulighetene for å utvikle verktøy og metoder for å skaffe et bedre beslutnings-grunnlag ved fornyelsesvurdering av høyspente luftlinjer i distribusjonsnettet hos Agder Energi Nett.

Forskerspørsmålet undersøker om det er hensiktsmessig å benytte risikobaserte metoder og kostnytte-analyser for å forbedre vedlikeholdsplanlegging, samt videreutvikle fornyelsesvurderingsprosessen, som et ledd i Agder Energi Netts strategiske mål om høy tilgjengelighet og utvidet levetid på nettanleggene.

Det ble valgt å benytte konstruktiv forskningsdesign som metodisk fremgangsmåte. Det finnes allerede et forslag til fornyelsesvurderingsprosess i Agder Energi Nett. Konstruksjonen i denne oppgaven er derfor å anse som en videreutvikling av eksisterende løsninger.

Oppgavens funn kan oppsummeres slik:

1) Det ble utarbeidet deskriptiv statistikk som gir en oversikt over eksisterende anlegg med geografisk beliggenhet, aldersfordeling, materialfordeling og svikterfaring, basert på tallmateriale fra Agder Energi Nett. Denne statistikken gir en god oversikt over situasjonen man befinner seg i, og kan benyttes som en del av beslutningsgrunnlaget i forbindelse med fornyelsesvurdering. Statistikken viser en investeringsbølge med spredning rundt 80-tallet. Dette betyr at en stor del av anleggene vil nå sin forventede tekniske levetid om noen ti-år. Dette er med på å øke behovet for gode vedlikeholdsmetoder.

2) Sviktintensiteten for tilfeldige feil er konstant, mens sviktintensitet for slitasjefeil vil være økende når enheten nærmer seg teknisk levetid. Slitasjefeil er dermed mulig å forutsi. En konsekvens av dette er at man kan kvitte seg med lagerbeholdning for slitasjefeil da materiell kan bestilles opp og enheten kan skiftes ut preventivt. På den annen side kan man beregne optimal lagerstørrelse for beredskap mot tilfeldige feil. Det viste seg at lagerberegningen ga usannsynlige lave lagerverdier, blant annet ble det anbefalt at beredskapslageret skulle inneholde 8 kilometer line, 1 stolpe, 2 isolatorer og ingen traverser. Dette er sannsynligvis fordi de «tilfeldige» feilene delvis er en funksjon av stormvær, og at det er nødvendig at Agder Energi Nett har en høy grad av beredskap for raskt å kunne gjenopprette strømforsyningen. Beredskap er også forskriftsregulert av Direktoratet for Samfunnssikkerhet og Beredskap (DSB). Vi vil derfor ikke anbefale å benytte metoden i denne oppgaven for å beregne optimalt beredskapslager.

3) RCM-metoden vil være et nyttig verktøy for bestemmelse av vedlikeholdspraksis. Dette er et nytt konsept for Agder Energi Nett. Vedlikeholdsmenyen i RCM-prosessen gjør det mulig å skreddersy vedlikehold til det enkelte anlegg, basert på hvilke feilmekanismer og risikokonsekvenser som kan inntreffe. Systematisk gjennomgang av menyen sørger for at alle aktuelle vedlikeholdsalternativer vil bli vurdert, og at eventuelle fornyelsesbeslutninger begrunnes godt. Dette kan være et viktig verktøy for å oppnå målene i forretningsplanen om å forlenge levetiden på nettanleggene, og for å unngå kostnader til unødvendig vedlikehold.

4) Ved å benytte stokastiske levetidsmodeller for aktuelle komponenter har det vist seg mulig å angi sannsynligheter for svikt i løpet av et tidsintervall. Dette blir benyttet i kost-nytte-analysen for å undersøke effekten av ulike alternativer. Det ble også utarbeidet et tilstandskaraktersystem som gjør det mulig å beregne feilingssannsynligheter basert på alder og tilstand, slik at den forventede restlevetiden for de aktuelle komponentene kan oppdateres. Dette er svært nyttig da komponenter kan slites ulikt avhengig av plassering og belastning. En oppdatering av levetidsmodellen til en komponent gjør derfor at vi kan skille komponenten fra den opprinnelige modellen ved å forlenge eller forkorte forventet levetid ut fra historisk slitasje. En del av et preventivt vedlikeholdsprogram er å kunne forutsi når en enhet vil feile for å kunne optimalisere utskiftningstidspunktet. Modellene angir sannsynlighet for feiling i løpet av et tidsintervall, og man kan dermed angi en grense for når enheten bør skiftes ut. Fra et nåverdiperspektiv er det også nyttig å utsette feil, da feilkostnadene vil ha lavere verdi lengre inn i fremtiden.

5) Det ble vist at kost-nytte-analysen ga realistiske resultater. Blant annet ga den utviklede kalkylen en klar indikasjon på lønnsomhet av både tiltak – sannsynlighet for negativ nåverdi på ca. 20 % – og fornyelse – neglisjerbar sannsynlighet for negativ nåverdi – på linje Skråstadvarden. Internrentemetoden ga avkastning med forventningsverdi på henholdsvis 38 % og 18 %. Tiltak ga dermed høyere forventet avkastning, men standardavviket var høyere enn for fornyelse. Kalkylen reagerer som forventet på ulike parametere, og vi antar derfor at den er velegnet til investeringsanalyse. Da kalkylen inkluderer stokastiske variabler er det viktig at det kjøres simuleringer. Dette må foretas for å generere en sannsynlighetsfordeling som representerer usikkerheten i alternativet.

Rapporten har dannet et rammeverk og en prototype for fornyelsesvurdering av høyspente luftlinjer i distribusjonsnett. Det har blitt supplert med risiko- og vedlikeholdsmetoder som er relevante for å stimulere riktig vedlikeholdsplanlegging. Det ble vist at de risikobaserte metodene som benyttes i offshorebransjen er overførbare til nettbransjen, og at disse vil kunne være effektive ved riktig bruk. Like problemstillinger og oppgaver øker sannsynligheten for at metodene i denne oppgaven kan overføres til resten av nettbransjen i Norge.

Abstract

The Norwegian electric utility industry is constantly being pushed towards more efficient operation of the power grid. This generates a demand for systematic methods and analyses for investment, operations and maintenance. This thesis explores the possibilities of developing tools and methods for use as decision support in renewal assessments of high voltage overhead lines in the distribution grid operated by Agder Energi Nett.

The research question of this thesis is to examine whether it is appropriate to use risk-based approaches and cost-benefit analyses to improve maintenance planning, as well as developing the renewal assessment process, as part of Agder Energi Nett's goals of extended lifetime and high reliability of power grid installations.

The work of the thesis is as following:

1) Descriptive statistics was developed to give an overview of the existing power grid, derived from data supplied by Agder Energi Nett. The statistics can be used as decision support in renewal assessments. The results show that a big proportion of the installations will reach their useful lifetime limit in a few decades, increasing the need for efficient maintenance methods.

2) The failure rate of random failures is constant, while wear-out failures generates an increasing failure rate as the unit approaches its lifetime limit. As a consequence, wear-out failures can be forecasted and stockpiles can be abolished since spare parts can be ordered for preventive replacement. In the case of random failures it is necessary to stockpile units for preparedness. The necessary size of the stockpile can be calculated from the necessary degree of protection and the rate of random failures. The method demonstrated in this thesis however, gave unrealistically low values for number of units in the stockpile. We therefore do not recommend this method in the case of Agder Energi Nett.

3) Reliability Centered Maintenance (RCM) proved to be a useful method for maintenance planning. The maintenance menu made it possible to tailor maintenance for individual installations, based on the failure mechanisms and risk consequences that may occur. Systematic review of the menu ensures that all relevant maintenance options will be considered, and that any renewal decisions can be justified. The RCM-method can prove to be an important tool for achieving Agder Energi Nett's business goals and to cut unnecessary maintenance costs.

4) By using stochastic lifetime models of the components, it has proved possible to specify probabilities of failure during a specific time interval. This is used in the Cost-Benefit analysis to examine the impact of various maintenance options. In addition, a condition grading system was developed. This system makes it possible to calculate failure probabilities based on age and condition, so that the expected remaining lifetime of the particular unit can be updated. This is very useful because units can wear out differently depending on location and load. The lifetime models also make it possible to optimize the preventive replacement interval based on failure probabilities, costs of failure and costs of replacement.

5) It was shown that the cost-benefit analysis gave realistic results. The analysis reacts as expected to different parameters, and we can therefore assume that it is useful for investment analyses. The method was tested on two cases; one with high probabilities of failures and one with high consequences of failure. The calculation gave clear indications of profitability of both full renewal and maintenance options. The calculation method makes use of stochastic variables, and as a consequence it is necessary to run simulations of the results in order to obtain a probability distribution that represents the uncertainties of the various options.

This thesis has made a framework and a prototype for renewal assessment of high voltage overhead lines in the distribution grid. It has been complemented by risk and maintenance methods that are relevant to encourage proper maintenance planning.. It was shown that the risk-based methods used in the offshore industry can be transmitted to the electric utility industry, and that these could be effective when used correctly. Similar issues and tasks across the Norwegian electrical utility industry increase the likelihood of transferability to the rest of the industry.

Tabeller

| | |
|---|-----|
| Tabell 4-1: Sviktmekanismer og -årsaker for luftnettkomponenter (Taraldsen & Augland, 2015)..... | 26 |
| Tabell 4-2: FMECA-prosessen [5] og [30] | 45 |
| Tabell 4-3: Preventive vedlikeholdstiltak [30] | 56 |
| Tabell 5-1: Antall og andel mastepunkt per tiårsperiode | 67 |
| Tabell 5-2: Antall mastepunkt per kommune, fordelt på tiårsperioder | 68 |
| Tabell 5-3: Antall og andel kilometer luftlinje per tiårsperiode | 70 |
| Tabell 5-4: Antall linjekilometer per kommune, fordelt på tiårsperioder | 71 |
| Tabell 5-5: Avbruddstatistikk for kraftledning | 79 |
| Tabell 6-1: Eksempel på karaktersetting for en komposittisolator | 86 |
| Tabell 6-2: Tabell som viser opprinnelig og oppdatert data for en Cu-line med tilstandskarakter 3 ved 61 år.... | 91 |
| Tabell 6-3: Parametere for de ulike alternativene – Trinn 3.0 Inn- og utdata | 104 |
| Tabell 6-4: Standardparametere – Trinn 3.0 Inn- og utdata | 104 |
| Tabell 6-5: Nåverdier, resultatgraf og deterministiske resultater – Trinn 3.0 Inn- og utdata | 105 |
| Tabell 7-1: Tilstandskarakterer for Skråstadvarden – Trinn 1.0 Pivot | 114 |
| Tabell 7-2: Parametere og nåverdier for Skråstadvarden-kalkyle – Trinn 3.0 Inn- og utdata | 116 |
| Tabell 7-3: Variabler for kalkulering av Skråstadvarden – Trinn 3.0 Inn- og utdata..... | 117 |
| Tabell 7-4: Tilstandskarakterer for imaginær linje – Trinn 2.0 Karaktertabell | 121 |
| Tabell 7-5: Inngangsvariabler og resultat fra imaginært eksempel – Trinn 3.0 Inn- og utdata..... | 121 |
| Tabell 7-6: Inngangsvariabler fra imaginært eksempel – Trinn 3.0 Inn- og utdata | 122 |
| Tabell 8-1: Eksempel på sviktintensitet, pålitelighet og tilstandskarakterer for en kreosotimpregnert stolpe.. | 132 |
| Tabell 8-2: Oppdatert pålitelighet og tilstandskarakterer for en kobberline | 134 |

Figurer

| | |
|---|----|
| Figur 2-1: Rammeverk for konstruktivistisk forskningsdesign [1] | 7 |
| Figur 3-1: Agder Energi Konsernstruktur..... | 15 |
| Figur 3-2: Dagens fornyelsesvurderingsprosess [12] | 19 |
| Figur 4-1: Teoretisk mastepunkt (venstre) [7], og virkelig mastepunkt (høyre) | 23 |
| Figur 4-2: Konstruksjonsløsninger for tremaster. Angrepspunkter for råte er markert med røde sirkler. [7]..... | 24 |
| Figur 4-3: Frekvensfunksjon og kumulativ fordelingsfunksjon [20] | 29 |
| Figur 4-4: Ulike Weibull-modeller med variabel m og $\theta = 20$ | 30 |
| Figur 4-5: Ulike Weibull-modeller med variabel m og $\theta = 10$ | 30 |
| Figur 4-6: Badekarkurven [21]..... | 32 |
| Figur 4-7: Pålitelighet $R(t)$ og oppdatert pålitelighet $R_B(t_n)$ [20] | 33 |
| Figur 4-8: Prosedyre for Monte Carlo-simulering [23] | 35 |
| Figur 4-9: Iterasjonsprosedyre for Monte Carlo-simulering [23] | 36 |
| Figur 4-10: Akkumulering av iterasjonsresultater [23] | 36 |
| Figur 4-11: Illustrasjon av Monte Carlo-simulering. Nåverdiberegning med to inngangsvariabler [24]..... | 37 |
| Figur 4-12: Illustrasjon av en MCS av netto nåverdi | 37 |
| Figur 4-13: Prosess for vurdering av risikoreduserende tiltak [26] | 40 |
| Figur 4-14: Et eksempel på risikomatrix, med markering av områder og virkning av RRM. [28] | 42 |
| Figur 4-15: Illustrasjon av pf- kurve [30] | 48 |
| Figur 4-16: Fremstilling av ulike sviktintensitets-forløp [30]..... | 49 |
| Figur 4-17: Virkning av vedlikehold for en gitt komponent [30] | 49 |
| Figur 4-18: Illustrasjon av optimalt utskiftingsintervall i forhold til forventet kostnad [30]..... | 50 |
| Figur 4-19: Trinn 0 – RCM [30] | 54 |
| Figur 4-20: Trinn 1 – RCM [30] | 55 |
| Figur 4-21: Trinn 2 - RCM gitt sikkerhetskonsekvens A [30] | 57 |
| Figur 5-1: Antall mastepunkt per femårsperiode..... | 67 |
| Figur 5-2: Antall mastepunkt per tiårsperiode, fordelt på kommune..... | 69 |
| Figur 5-3: Antall linjekilometer per femårsperiode..... | 70 |
| Figur 5-4: Antall linjekilometer per kommune og ti-år | 72 |
| Figur 5-5: Andel av nettet fordelt på line-materiale | 73 |
| Figur 5-6: Andel av linemateriale per tiårsperiode | 73 |
| Figur 5-7: Antall feil sortert på Kraftledning, filtrert på årsak..... | 75 |
| Figur 5-8: Kraftledning som andel av slitasjefeil. | 75 |
| Figur 5-9: Kraftledningsfeil som andel av tilfeldige feil..... | 76 |
| Figur 5-10: Gjennomsnittlig avbruddstid for slitasjerelaterte feil per år. | 76 |
| Figur 5-11: Gjennomsnittlig avbruddstid for tilfeldige feil per år. | 77 |
| Figur 5-12: Gjennomsnittlig avbruddstid for kraftledning fordelt mellom slitasje og tilfeldige feil, per år. | 77 |
| Figur 5-13: Gjennomsnittlig avbruddstid per feil for relevante komponenter.. | 78 |
| Figur 5-14: Totalt antall feil per komponent fordelt på slitasjefeil og tilfeldige feil. | 78 |
| Figur 5-15: Weibull-modell av avbruddstid for kraftledning..... | 79 |
| Figur 6-1: Utskiftings- og feilkostnader per tidsenhet for en stolpe, ved ulike utskiftingsintervall..... | 85 |
| Figur 6-2: Plotting av fordelingsfunksjon og kumulativ fordelingsfunksjon..... | 89 |
| Figur 6-3: Plotting av sviktintensitetsfunksjon og pålitelighetsfunksjon..... | 89 |
| Figur 6-4: Opprinnelig og oppdatert fordelingsfunksjon for en Cu-line med tilstandskarakter 3 ved 61 år..... | 90 |
| Figur 6-5: Opprinnelig og oppdatert pålitelighet for en Cu-line med tilstandskarakter 3 ved 61 år..... | 91 |
| Figur 6-6: Flytskjema for fornyelsesvurderingsprosessen..... | 93 |
| Figur 6-7: Et utdrag fra datasettet for Skråstadvarden - Trinn 1.0 Data | 96 |

| | |
|--|-----|
| Figur 6-8: Pivot-tabell av datasettet - Trinn 1.1 Pivot | 96 |
| Figur 6-9: Tilstandskarakterstabeller – Trinn 2.0 Karaktertabell | 98 |
| Figur 6-10: Mellomvariabler i kalkylen – Bakgrunn Kalkyle | 100 |
| Figur 6-11: Forventet restlevetid for gamle komponenter – Bakgrunn Restlevetid | 101 |
| Figur 6-12: Forventet restlevetid for nye komponenter – Bakgrunn Restlevetid | 101 |
| Figur 6-13: Datagrunnlag for levetidsmodeller – Bakgrunn Levetidsmodeller | 101 |
| Figur 6-14: Globale innstillinger for kalkylen – Bakgrunn Innstillinger | 102 |
| Figur 6-15: Resultatgraf (besparelse ved å velge fornyelse) fra en Monte Carlo-simulering i @Risk. | 105 |
| Figur 7-1: Terrengkart og linjekart for Skråstadvarden (NetBas) | 111 |
| Figur 7-2: Levetidsmodeller for komponenter på avgrensing Skråstadvarden | 112 |
| Figur 7-3: Resultater fra befaring på Skråstadvarden – Trinn 1.0 Pivot | 115 |
| Figur 7-4: Resultatgraf fra simulering av besparelse ved å velge tiltak på Skråstadvarden | 118 |
| Figur 7-5: Resultatgraf fra simulering av besparelse ved å velge fornyelse på Skråstadvarden | 118 |
| Figur 7-6: Kostnader spart ved å velge fornyelse fremfor tiltak | 118 |
| Figur 7-7: Monte Carlo-simulering av internrente ved valg av tiltak på Skråstadvarden | 119 |
| Figur 7-8: Monte Carlo-simulering av internrente ved valg av fornyelse på Skråstadvarden..... | 119 |
| Figur 7-9: Monte Carlo-simulering av internrentedifferanse ved å velge fornyelse fremfor tiltak på Skråstadvarden | 119 |
| Figur 7-11: Resultatgraf @Risk fra referanseeksempel. Besparelse tiltak | 123 |
| Figur 7-12: Resultatgraf @Risk fra referanseeksempel. Besparelse fornyelse | 123 |
| Figur 7-13: Besparelse for imaginær linje ved å velge fornyelse fremfor tiltak | 123 |
| Figur 7-14: Monte Carlo-simulering av internrente ved valg av tiltak på referanselinjen | 124 |
| Figur 7-15: Monte Carlo-simulering av internrente ved valg av fornyelse på referanselinjen | 124 |
| Figur 7-16: Monte Carlo-simulering av internrentedifferanse ved å velge fornyelse fremfor tiltak på Referanselinjen | 124 |
| Figur 8-1: Aldersfordeling for kobber-line (Cu) | 127 |
| Figur 8-2: Sviktsannsynligheter for kobber-line (Cu)..... | 128 |
| Figur 8-3: Oversikt over vedlikeholdsmeny til RCM (trinn 2) | 129 |
| Figur 8-4: Utskiftnings- og feilkostnader per tidsenhet for en stolpe, ved ulike utskiftningsintervall | 131 |
| Figur 8-5: Opprinnelig og oppdatert stokastisk modell for kobber-line (Cu) | 135 |
| Figur 8-6: Resultatgrafer fra kost-nytte-analyse av avgrensing Skråstadvarden | 136 |

Bilder

| | |
|---|-----|
| Bilde 4-1: BLL-linje på 24 kV (venstre) og FeAl-linje på 24 kV (høyre) | 22 |
| Bilde 4-2: Kreosotimpregnert stolpe | 24 |
| Bilde 4-3: Porselen piggisolator (venstre) og glass hengeisolator (høyre) | 26 |
| Bilde 6-1: Kontrollspørsmålene i PDA-modulen - Befaring | 95 |
| Bilde 7-1: Situasjonsbilde fra befarings på Skråstadvarden (mastepunkt #19) | 113 |
| Bilde 7-2: Avvik oppdaget ved befarings på Skråstadvarden..... | 114 |

Ord, uttrykk og forkortelser

| Stikkordsregister | Veiledning |
|----------------------------|--|
| Avbruddstid | Tid fra påbegynt feil til feilen er utbedret |
| Beredskapsanalyse | Etablering av dimensjonerende ulykkessituasjoner og etablering av funksjonskrav til beredskap |
| Beredskapsetablering | Planlegging og implementering av tiltak basert på beredskapsanalyse |
| Beredskapslager | Et lager som har som funksjon å oppbevare enheter til reparasjon av feil som følge av ulykker |
| Deskriptiv statistikk | Grunnleggende statistisk analyse av kvantitative data |
| Deterministisk variabel | En variabel som kun kan innta én verdi |
| Høyspent distribusjonsnett | Høyspent fordelingsnett (11-22 kV) som fordeler elektrisk energi fra krafttransformator til distribusjonstransformator. |
| Effektbryter | En bryter som kan koble ut en linje under belastning (effekt) |
| Faseline | Én enkelt line i et flerfaset system |
| Feilmode | Den fysiske eller funksjonsmessige effekten av feilen når en enhet feiler $f(t)$, beskriver hvor sannsynlige ulike resultater er i forhold til hverandre. |
| Fordelingsfunksjon | |
| Isolator | En enhet som har som funksjon å skille strømførende deler fra enheter med annet potensial |
| Konsekvens | Mulig følge av en uønsket hendelse |
| Kraftledninger | Elektrisk anlegg som befinner seg i friluft, hovedsakelig bestående av ledende "linjer" |
| Kreosot | Et impregneringsstoff bestående av ulike tjæreprodukter |
| Kurativt vedlikehold | Vedlikeholdstiltak som gjennomføres etter at en feil har oppstått |
| Lysbue | En strømbane i luft som går mellom to elektroder og som oppstår når spenningen er høyere enn luftens elektriske holdfasthet. |
| Mastepunkt | Konfigurasjon bestående av flere komponenter med oppgave å bære linen over jord. |
| NetBas | Nettverksinformasjonssystem utviklet av Powel |
| Preventivt vedlikehold | Tiltak som gjennomføres før en enhet feiler og som har som hensikt å forlenge levetid og pålitelighet. |
| Pålitelighet | En teknisk enhets evne til å utføre tiltenkt funksjon under gitte miljø og driftsforhold over en gitt tidsperiode |
| Risikoakseptkriterier | Kriterium som legges til grunn for akseptabel risiko |
| Risikomatrise | En todimensjonal matrise som representerer risiko t i form av sannsynlighet og konsekvens |
| Risikovurdering | Samlet prosess som består av planlegging, risikoanalyse og risikoevaluering |
| Slitasjefeil | En feiltype som har økende feilrate, og som er en funksjon av tid |
| Stokastisk variabel | En variabel som er definert ved en sannsynlighetsfordelingsfunksjon |
| Sviktintensitet | Mål på sannsynligheten for at en enhet feiler i løpet av et tidsintervall, gitt at enheten har overlevd opp til tiden t . |
| Tilfeldig feil | En feiltype med konstant feilrate. Inntreffer tilfeldig, uavhengig av tid |
| Tilstandsvurdering | Vurdering av en enhets tilstand ved bruk av tilstandskarakterer. |
| Travers | Tverrgående beslaget som bærer isolatorene i mastepunktet. |
| Weibull-fordeling | En to-parameter sannsynlighetsfordeling brukt ved levetidsberegninger. |

| Forkortelse | Veiledning |
|--------------------|---|
| ALARP | As Low As Reasonable Possible |
| BLL/BLX | Belagt line |
| CBA | Cost-Benefit Analysis |
| CDF | Cumulative Density Function |
| CFR | Constant Failure Rate |
| DFR | Decreasing Failure Rate |
| DSB | Direktoratet for sikkerhet og beredskap |
| FASIT | Feil og avbrudd i kraftsystemer |
| FeAl | Ledning med stålkjerne og aluminiumsleder |
| FEF | Forskrift om elektriske forsyningsanlegg |
| FMEA | Feilmode og Feileffektanalyse (Failure Mode, Effects Analysis) |
| FMECA | Feilmode, Effekt og Kritikalitetanalyse (Failure Modes, Effects and Criticality Analysis) |
| FSE | Forskrift om sikkerhet ved arbeid i og drift av elektriske anlegg |
| HAZID | Hazard Identification |
| HAZOP | Hazard and Operability Analysis |
| IFR | Increasing Failure Rate |
| ILE | Ikke Levert Energi |
| JIT | Just In Time |
| KILE | Kostander ved Ikke Levert Energi |
| LCC | Life Cycle Cost |
| MCS | Monte Carlo Simulering |
| MTBF | Mean Time Between Failures |
| MTBR | Mean Time Between Repairs |
| MTTF | Mean Time To Failure |
| MTTR | Mean Time To Repair |
| NNV/NPV | Netto Nåverdi/Net Present Value |
| NUP | Nettutviklingsplan |
| NVE | Norges vassdrags- og energidirektorat |
| OED | Olje og Energi Departementet |
| OREDA | Offshore Reliability Data |
| PDF | Probability Density Function |
| RAMS | Reliability, Availability, Maintainability and Safety |
| RCM | Pålitelighetsbasert vedlikehold (Reliability Centered Maintenance) |
| REN | Rasjonell Elektrisk Nettdrift |
| RRM | Risk Reduction Measures |

Innholdsfortegnelse

| | |
|--|------------|
| Forord | i |
| Sammendrag | ii |
| Abstract | iv |
| Tabeller | vi |
| Figurer | vii |
| Bilder | ix |
| Ord, uttrykk og forkortelser | x |
| Innholdsfortegnelse | xii |
| Kapittel 1: Innledning | 1 |
| 1.1 Bakgrunn for oppgaven..... | 1 |
| 1.2 Aktuelle problemstillinger..... | 2 |
| 1.3 Forskerspørsmål og oppgaveløsning..... | 3 |
| 1.4 Formålet med arbeidet..... | 4 |
| 1.5 Avgrensninger..... | 5 |
| 1.6 Rapportstruktur..... | 6 |
| Kapittel 2: Metodisk forskningsbasert arbeidsmåte | 7 |
| 2.1 Konstruktiv forskningsdesign..... | 7 |
| 2.2 Datainnsamling..... | 10 |
| 2.3 Datakvalitet..... | 12 |
| Kapittel 3: Om Agder Energi Nett | 15 |
| 3.1 Markeds-, produkt- og tjenestetilbud..... | 15 |
| 3.2 Sentrale knapphetsfaktorer..... | 16 |
| 3.3 Strategi..... | 16 |
| 3.4 Dagens situasjon og metode..... | 17 |
| 3.5 Myndighetsorganisasjoner..... | 20 |
| Kapittel 4: Grunnleggende teori og metodikk | 21 |
| 4.1 Beskrivelse av høyspent distribusjonsnett..... | 21 |

| | | |
|---|---|------------|
| 4.2 | Usikkerhet og sannsynlighet | 27 |
| 4.3 | Monte Carlo-simulering..... | 34 |
| 4.4 | Definisjon av risiko | 38 |
| 4.5 | FMECA | 44 |
| 4.6 | HAZOP..... | 47 |
| 4.7 | Preventivt vedlikehold..... | 48 |
| 4.8 | Kurativt vedlikehold | 52 |
| 4.9 | Pålitelighetsbasert vedlikehold (RCM) | 54 |
| 4.10 | Innsamling og behandling av pålitelighetsdata..... | 58 |
| 4.11 | Økonomi og kapitalforvaltning..... | 63 |
| Kapittel 5: Statistisk analyse av systemer og driftsdata | | 67 |
| 5.1 | Grafisk fremstilling av distribusjonsnett | 67 |
| 5.2 | Grafisk presentasjon av feilstatistikk..... | 75 |
| 5.3 | Nøkkeltall til avbruddstid | 79 |
| 5.4 | Kostnader | 80 |
| 5.5 | Levetidsdata | 81 |
| Kapittel 6: Presentasjon av løsning | | 82 |
| 6.1 | Sviktmekanismer og sviktintensitet | 82 |
| 6.2 | Risikoakseptkriterier..... | 86 |
| 6.3 | Utvikling av levetidsmodeller | 87 |
| 6.4 | Fornyelsesvurderingsprosessen | 92 |
| 6.5 | Trinn 1 – Datainnsamling..... | 94 |
| 6.6 | Trinn 2 – Risikovurdering og alternativer | 97 |
| 6.7 | Trinn 3 – Kalkulering av kostnader | 99 |
| 6.8 | Trinn 4 – Oppsummering og beslutning..... | 109 |
| Kapittel 7: Testing og evaluering av løsning | | 111 |
| 7.1 | Skråstadvarden case study | 111 |
| 7.2 | Referanseeksempel med innvirkning av endringer..... | 121 |
| Kapittel 8: Diskusjon | | 127 |
| 8.1 | Er det hensiktsmessig å benytte deskriptiv statistikk?..... | 127 |
| 8.2 | Har Offshore-bransjen vedlikeholdspraksis som kan overføres til nettbransjen? | 128 |

| | | |
|-------------------------------------|--|------------|
| 8.3 | Er det hensiktsmessig å benytte tilstandskarakterer? | 132 |
| 8.4 | Er det hensiktsmessig å benytte levetidsmodeller?..... | 133 |
| 8.5 | Er det hensiktsmessig å benytte kost-nytte-analyse (CBA) for alternativvurderinger?..... | 135 |
| 8.6 | Vil metodene og verktøyene i prosessen bidra til å forbedre AE Netts vedlikehold? | 137 |
| 8.7 | Kritikk av metode | 140 |
| 8.8 | Kritikk av datagrunnlag..... | 142 |
| Kapittel 9: Konklusjon | | 143 |
| 9.1 | Deskriptiv statistikk | 143 |
| 9.2 | Sviktmekanismer | 143 |
| 9.3 | Pålitelighetsbasert vedlikehold | 144 |
| 9.4 | Levetidsmodeller | 144 |
| 9.5 | Investering basert på kost-nytte-analyse..... | 144 |
| 9.6 | Fornyelsesvurderingsprosessen | 145 |
| 9.7 | Videre arbeid | 146 |
| Referanser | | 147 |
| Vedlegg..... | | 150 |
| | Vedlegg A - FASIT-skjema | 151 |
| | Vedlegg B - Brukerhåndbok for fornyelsesbefaring | 153 |
| | Vedlegg C - E-mail til eksperter | 159 |
| | Vedlegg D - Tilbakemelding fra eksperter | 161 |
| | Vedlegg E - HAZOP..... | 162 |
| | Vedlegg F - Diverse grafer fra feilstatistikk..... | 164 |
| | Vedlegg G - FMECA-analyse av line | 166 |
| | Vedlegg H - Feilmekanismer og feilårsaker for kraftledning | 167 |
| | Vedlegg I - Sviktintensiteter for kraftledning | 169 |
| | Vedlegg J - Beredskapslagerberegning..... | 170 |
| | Vedlegg K - PDA-inspeksjonsrutine (flytskjema) | 172 |
| | Vedlegg L - Trinn 4, oppsummering og beslutning (forslag) | 173 |
| | Vedlegg M - Linjeprofiler for avgrensning Skråstadvarden | 176 |
| | Vedlegg N - Eksisterende, førsteutkast og revidert fornyelsesvurderingsprosess..... | 177 |
| | Vedlegg O - Brukerbeskrivelse av fornyelsesvurderingsprosessen..... | 180 |
| | Vedlegg P - Levetidsmodeller og tilstandskarakterer for kraftledningskomponenter..... | 183 |

Kapittel 1: Innledning

1.1 Bakgrunn for oppgaven

I de senere år har nettselskapene fått økt press på kostnadssiden fra flere hold. Det er krav fra myndighetene om at nettet skal driftes mer effektivt, og at hver forvaltede krone skal gi mer tilbake til forbruker. Det er også krav fra eiere – hovedsakelig i form av kommunene – om utbytte. Dette gjør at det stilles strengere krav til systematiske metoder og gode analyser for investering, drift og vedlikehold.

Et av fokusområdene for nettselskapene generelt, og Agder Energi Nett spesielt, er å øke levetiden på nettanleggene og utvikle metoder for å optimalisere vedlikeholdet. Dette skal sørge for høyere avkastning på investert kapital, og riktige investeringer («Mer for mindre»). Det er særlig ønskelig å utvikle metodene for fornyelsesvurdering, for å undersøke om man kan forlenge levetiden til anleggene av eldre årgang.

En stabil strømforsyning er svært viktig for dagens samfunn. Det er derfor viktig at økt levetid på nettanleggene ikke påfører samfunnet økte kostnader i form av lengre og hyppigere strømvbrudd. Samfunnsøkonomiske tap som følge av strømvbrudd kostnadsføres normalt i nettselskapene via KILE-ordningen, og KILE-kostnadene er derfor en viktig parameter i denne sammenheng. Disse kostnadene er det ønskelig å minimere. På den annen side er nettselskapene forvaltere av samfunnets ressurser. Alle investeringer som blir foretatt i nettet representerer en kostnad for samfunnet i form av økt nettleie. Det er derfor ønskelig at det etableres en balanse der man foretar de investeringene som i høyest grad reduserer konsekvens og sannsynlighet for strømvbrudd per krone investert.

Frem til i dag har fornyelsesvurderingene i stor grad blitt foretatt på individuelt basis av erfarne ingeniører. Dette har fungert bra med de rammene og ressursene som nettselskapene har hatt. Endrede vilkår og forutsetninger setter imidlertid strengere krav til at slike vurderinger blir foretatt systematisk og med standardiserte metoder, slik at de i større grad blir tilgjengelige for ettertiden, og for å muliggjøre målinger av effektiviteten til de beslutningene som blir tatt. Den enkelte ingeniørs arbeidsoppgaver og arbeidsområder har blitt stadig mer spesialisert. Dette nødvendiggjør at flere ulike seksjoner og avdelinger inkluderes i vurderingene for å bidra med sin relevante kompetanse, slik at resultatene av vurderingene blir optimale.

Offshorebransjen har på grunn av strenge myndighetsreguleringer og meget høye nedetid-kostnader utviklet gode metoder for optimalisering av investeringer, vedlikehold og levetid. Offshorebransjen har vært gode på å styre risiko – gitt konsekvensene og sannsynligheten for ulykker på en plattform. Det ligger derfor mye kompetanse i denne bransjen, og potensialet for metodeoverføring til andre bransjer kan være høyt. Det er derfor av interesse for nettbransjen at muligheten for kompetanseoverføring fra en bransje der den norske kompetansen er svært omfattende undersøkes.

1.2 Aktuelle problemstillinger

Agder Energi Nett har i de senere år fått høyere kostnadspress. Med krav om utbytte til kommunale eiere, høyere effektivitetskrav fra myndighetene og ny forretningsmodell, stilles det krav til mer effektiv drift av nettanlegg. Agder Energi Nett ønsker i denne sammenheng å se på mulighetene for å utvikle verktøy og metoder for å skaffe et bedre beslutningsgrunnlag ved fornyelsesvurdering av nettanlegg.

Den opprinnelige problemstillingen, slik den ble oversendt av Terje Taraldsen fra AE Nett, så slik ut:

«Optimering av reinvestering i Distribusjonsnett (12-24 kV)»

- *Vurdering av teknisk levetid på Distribusjonsnettets hovedkomponenter (linje, transformator, kabel, nettstasjon).*
- *Vurdere muligheter for videreutvikling av feilstatistikken med fokus på bedre tilknytning til anlegg og komponenter.*
- *Vurdere videreutvikling av dagens modell og metoder for fornyelsesvurdering (HMS/teknisk/økonomisk/KILE).*

Denne problemstillingen ble videreutviklet og det ble valgt å legge fokus på selve fornyelsesvurderingsprosessen og tilknyttet vedlikeholdspraksis, og begrense oppgaven til luftnett:

«Bidra til å utvikle effektiv vedlikeholdsmetodikk for høyspent luftnett i distribusjonsnett»

Hovedmålet med oppgaven blir derfor å lage et rammeverk for en mer systematisk og analytisk fornyelsesvurderingsprosess, ved bruk av risikoverktøy og -metoder. En del av metodene hentes fra offshorebransjen, som allerede har meget gode og utprøvde metoder for risikoanalyse av anlegg, og bestemmelse av vedlikeholdstiltak.

1.3 Forskerspørsmål og oppgaveløsning

Basert på bakgrunnsinformasjonen og problemstillingene har vi i samarbeid med veileder Tom Lassen kommet frem til følgende forskerspørsmål:

«Undersøke om det er hensiktsmessig å benytte risikobaserte metoder og kost-nytte-analyser for å forbedre vedlikeholdsplanlegging, samt videreutvikle fornyelsesvurderingsprosessen, som et ledd i Agder Energi Netts strategiske mål om utvidet levetid på nettanlegg.»

Forskerspørsmålet gir to naturlige delspørsmål:

1. «Undersøke om risikobaserte metoder er velegnet for å utvikle et preventivt vedlikeholdsprogram.»
2. «Undersøke om kost-nytte simuleringer er velegnet for å ta avgjørelser om store investeringer for kraftlinjer.»

Følgende momenter blir fokusområder under forskerspørsmålet:

1. Preventivt planlagt vedlikehold
2. Teknisk pålitelighet og levetidsmodeller
3. Kost-nytte-analyser for reinvesteringer

Under emnene «preventivt planlagt vedlikehold» og «teknisk pålitelighet og levetidsmodeller» finner vi blant annet pålitelighetsbasert vedlikehold (RCM). Dette verktøyet skal undersøkes, og oppgaven skal knyttes om mot RCM-teorien. Utover dette vil det bli aktuelt å benytte statistiske metoder og modelleringer for å lage levetidsmodeller for de ulike komponentene, og benytte tilstandsverdier for å fastsette forventet restlevetid. Andre temaer som er aktuelle er optimalt vedlikehold, bestemmelse av sviktintensitet og herunder bestemmelse av beredskapslagerstørrelse.

Under emnet «kost-nytte-analyser for reinvesteringer» vil det bli aktuelt å undersøke kost-nytte-analyser (CBA) for å beregne fremtidige kostnader av ulike alternativ som må vurderes i en fornyelsesvurderingsprosess. Det er ønskelig å knytte denne analysen opp mot pålitelighetsemnene, ved å inkludere forventet restlevetid for de ulike komponentene på det anlegget som vurderes. Utover dette er det ønskelig at usikre parametere modelleres som stokastiske variable, og at man undersøker bruken av dataverktøy for å foreta Monte Carlo-simuleringer.

Det er viktig med en god forståelse av hva risiko er, og en del grunnleggende risikobegreper vil derfor bli gjennomgått. Det vil legges vekt på at alle anslag om fremtiden er usikre, og at informasjon om usikkerheten er en viktig del av et godt beslutningsgrunnlag. God kunnskap om statistikk er viktig for å kunne forstå usikkerheten, og en del grunnleggende statistikk vil derfor også gjennomgås.

1.4 Formålet med arbeidet

Hovedformålet med oppgaven er å etablere en ny fornyelsesvurderingsprosess, med tilhørende verktøy, ved bruk av kompetanseoverføring fra offshore oljeindustri. De andre deloppgavene støtter opp om dette, og skal bidra til en helhetlig tenking rundt risiko. Dette dreier seg blant annet om riktig vedlikehold, at det tas hensyn til usikkerhet, risikobaserte vedlikeholdsmetoder etc.

Formålene med oppgaven kan deles opp i følgende punkter:

- Lage levetidsmodeller for de ulike komponentene som skal vurderes.
- Videreutvikle kriterier for tilstandsvurdering ved bruk av tilstandskarakterer.
- Videreutvikle prosess for fornyelsesvurdering av høyspent luftnett.
- Presentere risikobaserte vedlikeholdsmetoder etter inspirasjon fra offshore oljeindustri

Formålet med oppgaven er å lage et rammeverk for fornyelsesvurdering. Dette betyr blant annet at det som presenteres er et forslag og at det er metodene som benyttes som er det viktige. For eksempel har vi ikke foretatt nøyaktige undersøkelser av komponentenes levetid. Levetidsmodellene baserer seg kun på ekspertuttalelser fra bransjefolk. Utover dette må de som benytter seg av metodene og prosessen i denne oppgaven raffinere disse og tilpasse dem slik at de blir relevante. Hensikten med en systematisk prosess er også å kunne etterprøve og justere metodene og beslutningene for å oppnå bedre resultater.

1.5 Avgrensninger

Oppgaven omhandler kun det høyspente luftnettet med spenningsnivå fra 12 til 24 kV i Agder Energi Netts konsesjonsområde. Det er overføringssystemet som er fokus for oppgaven. Nettstasjoner, kabler og lignende er derfor ikke tema for oppgaven.

Vi har valgt å fokusere på de antatt viktigste komponentene på linjen: Stolpe, line, isolator, travers. Komponentene som vurderes deles ikke opp i ytterligere underkomponenter eller antall. Det vil for eksempel si at et isolatorsett i et mastepunkt vurderes som én enhet, og at alle feil og utskiftninger gjelder hele enheten.

En del av de normale kostnadene forbundet med en høyspent luftlinje er ekskludert fra kost-nytteanalysen. Dette er hovedsakelig kostnader som er like for alle alternativene. Analysen begrenser seg til de tre alternativene «ingen tiltak», «tiltak» og «fornyelse». Det beregnes kun nytte av alternativer i operativ dimensjon. Risiko i miljø- og sikkerhets-dimensjonene utelates.

Oppgavens hovedfokus er slitasjerelaterte skader og feil. Dette betyr at feil som bedømmes å ha sitt opphav i tilfeldige feil ikke inkluderes i kost-nytteanalysen. Det er viktig å foreta dette skillet da man til forskjell fra slitasjerelaterte feil ikke kan vedlikeholde seg ut av problemer med tilfeldige feil. Vedlikehold er ikke forebyggende for slike problemer og krever derfor andre tilnærminger.

Oppgaveløsningen vil inneholde en del forslag til verdier. Dette vil for eksempel gjelde pålitelighetsgrenser for tilstandskarakterer, levetidsmodellene til de ulike komponentene, avbruddslengde etc. Disse verdiene må endres og tilpasses for å kunne anvendes. Dette gjelder for alle oppgavens løsninger, da hovedfokuset er rammene og prosessen, ikke de spesifikke verdiene.

1.6 Rapportstruktur

Kapittel 2: Innledende i rapporten gjennomgås metodologien som har blitt brukt i oppgaveløsningen. Her diskuteres metodene som har blitt brukt for å svare på forskerspørsmålet, og for å samle inn data for å løse oppgaven. I dette kapitlet diskuteres også validiteten og reliabiliteten av løsningen.

Kapittel 3: I neste kapittel gjennomgås bakgrunnsinformasjon om Agder Energi Nett. Her presenteres informasjon om selskapet, rammevilkår, strategi og mål. Dette er viktig da det danner grunnlaget for å forstå behovet for oppgaven. I tillegg beskrives dagens situasjon og metoder, hvilke myndighetsorganisasjoner som regulerer Agder Energi Nett, og hvilke retningslinjer og forskrifter selskapet må forholde seg til.

Kapittel 4: I teorikapitlet gjennomgås all den teori og de metoder som danner grunnlaget for oppgaveløsningen. Først presenteres distribusjonssystemet som rapporten omhandler, inkludert komponentene som systemet består av. Deretter gjennomgås grunnleggende statistikk, samt den matematikken som benyttes til modellering av stokastiske variabler og beregning av sviktintensitet og pålitelighet. Beskrivelse av Monte Carlo-metoden kommer etter dette. Neste del av teorikapitlet omhandler risikobegreper. Deretter presenteres verktøy for risikoanalyse. De tre neste kapitlene omhandler preventivt, kurativt og pålitelighetsbasert vedlikehold. De to siste kapitlene omhandler pålitelighetsdata og økonomi.

Kapittel 5: I kapitlet om deskriptiv statistikk presenteres data som har blitt samlet inn for rapporten. Dette inkluderer grafiske fremstillinger av nettinformasjonen og feilstatistikken.

Kapittel 6: Her presenterer vi de metodene, verktøyene og prosessene som utgjør oppgaveløsningen. Dette inkluderer detaljerte beskrivelser av funksjon og fremgangsmåte.

Kapittel 7: I evalueringskapitlet gjennomgår vi utprøvingen av oppgaveløsningen. Det ble foretatt en reell test av løsningen ute i felt. Denne suppleres med et referanseeksempel for å kunne sammenligne resultatene.

Kapittel 8: I diskusjonskapitlet blir løsningene og evalueringsresultatene drøftet og diskutert. Kritik av metode og datagrunnlag er også en del av dette kapitlet.

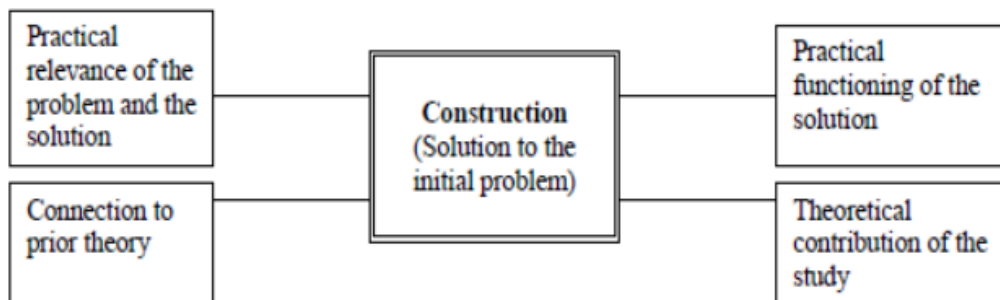
Kapittel 9: Til slutt konkluderer vi kort om rapportens resultater. Det presenteres også muligheter for videre arbeid og forslag til hva som bør undersøkes nærmere.

Kapittel 2: Metodisk forskningsbasert arbeidsmåte

Vi vil i dette kapittelet presentere rammeverket for løsningen av oppgaven. Dette inkluderer metodene som har blitt benyttet for datainnsamling. Den metodiske forskningsbaserte arbeidsmåten er basert på konstruktiv forskningsdesign.

2.1 Konstruktiv forskningsdesign

Konstruktiv forskningsdesign tar utgangspunkt i utvikling av en konstruksjon som skal bidra til å løse et problem. Enten i form av å skape kunnskap om hvordan problemet kan løses, eller hvordan en eventuell ny løsning kan defineres som en fornyelse eller en forbedring av foregående løsning.



Figur 2-1: Rammeverk for konstruktivistisk forskningsdesign [1]

Utfallet av konstruktiv forskningsdesign skal blant annet bidra til nye konstruksjoner, konsepter, modeller, metoder eller forbedringer, og bidraget kan være relatert til bruken av en eksisterende løsning i et nytt domene. Konstruktiv forskningsdesign består av seks trinn [2]:

- Trinn 1: Ta utgangspunkt i et praktisk relevant problem som også har forskningspotensial.
- Trinn 2: Opparbeid en generell og omfattende forståelse av emnet.
- Trinn 3: Konstruksjon av en ny og innoverende løsning.
- Trinn 4: Demonstrasjon av løsning.
- Trinn 5: Teoretiske tilkoblinger og forskningsbidrag av løsning.
- Trinn 6: Undersøkelse av anvendbarhet av løsning.

Vi skal i det følgende ta for oss de enkelte trinn i detalj.

2.1.1 Praktisk relevans av problemet og løsningen

Problemstillingen tar utgangspunkt i Agder Energi Netts ønske om å utvikle en ny og forbedret prosess for fornyelsesvurdering av høyspent luftlinjer i distribusjonsnett. Etter møter med Agder Energi Nett ble det til slutt en enighet om at oppgaven begrenses til fornyelsesvurdering av høyspente luftlinjer i distribusjonsnett.

Nettbransjen i Norge står foran store milliardinvesteringer i form av vedlikehold, utskiftning og fornyelse av deler av nettet pga. aldrende anlegg og lave investeringer i foregående år [3]. Problemstillingen som presenteres i oppgaven er godt kjent, og det finnes flere forskningsprosjekter på området. Blant annet jobber Energi Norge i disse dager med videreutvikling Statkraftalliansens prosess for fornyelsesvurdering (FoU-prosjekt) [4]. Oppgaven vil være relevant i denne settingen, da

problemstillingen som presenteres i denne oppgaven tar for seg Agder Energi Nett og nettbransjens fremtidige utfordringer når det kommer til fornyelsesvurdering.

Løsningene som presenteres er ment som et grunnlag for utvikling av fornyelsesprosessen for høyspente luftlinjer i distribusjonsnett til Agder Energi Nett. I tillegg til at gjennomføringen og tankesettet bak fornyelsesprosessen kan overføres til andre spenningsnivåer og andre elektriske anlegg, vil løsningene samtidig gi Agder Energi Nett nye metoder og verktøy for å møte fremtidige vedlikeholds- og fornyelsesutfordringer. Løsningene vil også være delvis overførbare til andre nettselskap da tilstandsvurderingsprosessen kan tilpasses og arbeidsoppgaver og utfordringer stort sett er felles for alle norske nettselskap.

Oppgaven tar utgangspunkt i et praktisk og relevant problem tilknyttet Agder Energi Netts drift av høyspente luftlinjer i distribusjonsnett. Basert på tidligere og parallelle forskningsprosjekter på dette området og tilbakemeldinger fra nettselskapet, ser vi stor anvendbarhet av løsningene vi fremstiller i denne oppgaven.

Oppgavens formål er også sterkt knyttet opp mot Agder Energi Netts forretningsplan for 2015-2018. Agder Energi Nett ønsker å rette et stort fokus på fremtidige investeringer og kapitalbinding. Videre er det ønskelig å øke levetiden på anleggene, blant annet ved innføring av mer systematisk bruk og gjennomføring av fornyelsesvurderinger.

2.1.2 Forbindelse med tidligere teori

Teorien for risiko- og vedlikeholdsmetodene som kan benyttes på denne problemstillingen finnes i stor grad i form av standarder og metoder for offshore oljeindustri. Det har derfor blitt foretatt et valg om å forsøke å benytte kompetanseoverføring fra oljebransjen til nettbransjen, for å se om metodene lar seg tilpasse. Utover dette har også SINTEF Energi utstrakt forskning på området, og en noenlunde lik problemstilling forsøkes løst gjennom det pågående REPLAN-prosjektet.

Forskerspørsmålet fremstilt i oppgaven bygger i hovedsak på pensum i IND506 Risikostyring og kvalitetsledelse ved Universitetet i Agder. Det har blitt fremstilt ulike teorier og metoder til bruk i forbindelse med vedlikeholdsarbeid og økonomiske beslutninger. Oppgaven kombinerer både risikovurdering og økonomiske vurderinger i fornyelsesvurderingsprosessen, noe som gir gode grunnlag for beslutninger. Kombinasjonen av det tekniske og det økonomiske er kritisk i forbindelse med vurdering av investeringer av denne typen.

Risikoteorien og -metodene presentert i oppgaven er essensielle deler av løsningen på problemstillingen. Deler av teoribakgrunnen er innhentet fra kompendium-serien «Pålitelighetsbasert vedlikehold» utarbeidet av Tom Lassen, som går inn på logiske analyser og planlegging av vedlikehold, statistiske metoder og levetidsmodeller. Rausand og Utnes «Risikoanalyse» [5] blir også brukt omfattende. I tillegg til risikoteori benytter oppgaven økonomiske beregninger i form av kostnytte-analyser, hentet fra standarden NORSOK Z-013. Det har også blitt foretatt stokastiske beregninger hvor det har blitt benyttet simuleringsverktøyet @Risk (Monte Carlo-simulering).

2.1.3 Konstruksjon

Konstruksjonen i denne oppgaven består av en fornyelsesvurderingsprosess av luftlinjer i det høyspente distribusjonsnett, samt verktøy, dokumentasjon og teorioverføring fra andre bransjer. Fornyelsesvurderingsprosessen består av fire trinn:

- Trinn 1 tar for seg datainnsamling
- Trinn 2 tar for seg risikovurdering og utarbeidelse av alternativer
- Trinn 3 tar for seg kostnadskalkulering av alternativene
- Trinn 4 tar for seg oppsummering for å beslutte hvilket alternativ som skal iverksettes

En stor del av formålet med konstruksjonen er å kunne dokumentere og kvalitetssikre fornyelsesvurderingsprosessen. Det er også et mål at fornyelsesvurderingsprosessen skal bli mer nøyaktig – det vil si å gi et bedre beslutningsgrunnlag slik at de «riktige» tiltak blir valgt. En del av verktøyene tilknyttet konstruksjonen er hentet fra andre bransjer som allerede ligger langt fremme på dette feltet. En av de viktigste teoretiske overføringene herifra er et etterprøvbart system for å kunne justere prosessene og korrigere for feilantakelser.

En viktig del av konstruksjonen er de foreslåtte verktøyene, slik som RCM for preventivt planlagt vedlikehold, og CBA for store reinvesteringer. Dette er nye konsepter for AE nett, og det eksisterer ingen slike verktøy som benyttes i dag. Dette er velkjente metoder fra én bransje – offshore oljeindustri – som skal forsøkes overført til en annen bransje – nettbransjen. For ytterligere informasjon og detaljer om disse metodene og verktøyene, se kapittel 4.

2.1.4 Praktisk funksjon av løsningen

Løsningen oppgaven presenterer er i overensstemmelse med Agder Energi Netts forretningsplan for 2015 – 2019 som innebærer et fokus på investeringer og risikovurderinger. Oppgaveløsningen skal danne et grunnlag for hvordan Agder Energi Nett i fremtiden skal foreta fornyelsesvurderinger på høyspente luftlinjer i distribusjonsnettet. Løsningen vil i tillegg kunne danne grunnlag for fornyelsesvurdering av andre elektriske anlegg og for andre spenningsnivåer. Det ble foretatt en demonstrasjon av vår prototype for fornyelsesvurdering av høyspente luftlinjer hvor Agder Energi Nett selv var med på å teste trinn 1 av løsningen.

Oppgaven vil gi ny innsikt i hvordan Agder Energi Nett kan og bør håndtere reinvesteringer i forbindelse med fornyelse av høyspente luftlinjer i distribusjonsnettet.

I samarbeid med systemansvarlig NetBas vedlikehold, Jarle Stokke-Olsen, har det blitt foretatt en videreutvikling i form av digitalisering av trinn 1 av fornyelsesvurderingsprosessen, fremfor bruk av penn og papir. Denne metoden vil effektivisere og forenkle prosessen ved datainnsamling, i tillegg er den direkte knyttet opp mot AE Netts nettverksinformasjonssystem (NIS) NetBas. Løsningen tar i bruk en PDA (nettbrett) som synkroniseres opp mot NetBas hvor tilstandskarakterer og avvik for de ulike komponentene i et mastepunkt kan registreres.

I eksisterende fornyelsesvurderingsprosess ble det lagt stor vekt på den totale tilstandskarakteren til kraftlinjen. I vår fornyelsesvurderingsprosess er det lagt større vekt på kombinasjonen mellom risiko og økonomiske vurderingspunkter. Dette utføres ved hjelp av systematiske risikoverktøy (RCM, levetidsmodeller etc.) som i hovedsak er blitt anvendt innenfor militær, -fly, - og oljebransjen. En slik implementering vil kunne føre til at Agder Energi Nett kan ta bedre beslutninger omkring fornyelse av høyspente luftlinjer i distribusjonsnettet. Vi ser også for oss at denne metodikken kan legge grunnlaget for fornyelsesvurderingsprosesser for andre elektriske anlegg.

2.1.5 Teoretisk bidrag

Løsningen på utfordringen rundt fornyelsesvurdering av høyspente luftlinjer i distribusjonsnett baserer seg på allerede eksisterende teori og vil med det ikke gi et originalt teoretisk bidrag, men et formål med oppgaven har vært å overføre metoder og tankemønstre som i stor grad anvendes i offshorebransjen over til nettbansjen.

Under utviklingen av oppgaven har vi støtt på problemstillinger som er felles for bransjen. En del av disse problemstillingene forsøkes løst gjennom forskningsprosjekter i regi av Energi Norge (REPLAN FoU-prosjekt). Oppgavens løsning vil derfor kunne være et innspill til blant annet REPLAN.

2.2 Datainnsamling

2.2.1 Kvalitative og kvantitative metoder

Datagrunnlaget for denne oppgaven stammer fra ulike kilder. Dataene er samlet inn ved hjelp av både kvalitative og kvantitative metoder. De kvalitative dataene stammer hovedsakelig fra samtaler og e-postintervju av eksperter i bransjen, samt styrende dokumenter og retningslinjer. Dette gjelder blant annet grunnlaget for å bestemme grensene for komponentenes tilstandskarakterer. De kvantitative dataene stammer hovedsakelig fra Agder Energi Netts feildatabase (FASIT) og NIS-systemet NetBas. Dette gjelder data for type og omfang av alle registrerte feil fra 2001, samt oversikt over antall, type og plassering av komponentene som utgjør distribusjonsnett på Agder. Utover dette har eksperter besvart et spørreskjema angående nettkomponenters forventede tekniske levetid.

Kvantitativ forskning omhandler data som kan kvantifiseres og summeres. De numeriske dataene kan analyseres ved bruk av matematiske metoder og resultatet kan uttrykkes med statistiske terminologier [6]. Ved bruk av den kvantitative metode blir det innsamlede datagrunnlaget gjerne kvantifisert og fragmentert for å kunne passe inn i målbare kategorier for å kunne trekke konklusjoner og generaliseringer om lignende fenomener. Disse kategoriene kan for eksempel finnes i form av skaleringer for å avgjøre graden av et fenomen, eller distinkte kategorier for å bestemme fenomenets type etc. [6]. Som et eksempel kan vi ta innsamlingen av feildata for senere analyse. For å gjøre dette benyttes et standardisert FASIT-skjema (se vedlegg A). Her benyttes generaliserte svaralternativer for senere å kunne analysere feilen og sammenligne den med andre feil av samme type. Etter en tidsperiode har man et datagrunnlag som kan analyseres matematisk for å evaluere metoder og danne beslutningsgrunnlag.

Kvalitativ forskning søker å forstå og fordype seg i et fenomen. Dette omhandler data som ikke manipuleres eller analyseres ved bruk av kvantifisering og statistiske metoder [6]. Her søker man å oppnå innsikt og sette lys på fenomener gjennom intervjuer og observasjoner av dem eller det som forskes på. Funnene forsøkes så å utvides og ekstrapoleres til lignende fenomener som det man har forsket på [6].

2.2.2 Håndbøker og tilstandskontrolldokumenter

En arbeidsgruppe bestående av representanter fra HelgelandsKraft, Trønderenergi, BKK Nett og SINTEF, har gjennom Energi Norges fellesfinansierte Prosjekt «Tilstandskontroll og restlevetid for nettkomponenter» utarbeidet en håndbok for tilstandskontroll av kraftledninger. Håndboken dekker komponentene faseline, kontaktklemmer og skjøter og tremaster. Håndboken er omfattende og

dekker skademekanismer, skadeårsaker og tilstandskontrollmetoder. Håndboken har blitt benyttet i oppgaven for å beskrive ulike tilstander for de komponentene den dekker. [7]

Utover dette har REN utarbeidet vedlikeholdsstandarder for ulike komponenter i kraftnettet. Disse dekker tilstandsvurderingene og setter toleransegrenser for komponentslitasje. Dette gjelder REN-blad 2045, Tilstandskontroll oppheng; 2029, Tilstandskontroll traverser; og ulike publikasjoner og presentasjoner utarbeidet av REN og SINTEF. Disse bladene og publikasjonene ble gjennomgått i samarbeid med AE Nett for å avgjøre hvilken tilstandskarakter som skulle knyttes til hvilken tilstand. Med ytterligere erfaringer fra fornyelsesbefaringer vil disse sannsynligvis justeres.

2.2.3 Intervjuer og samtaler med eksperter

I samtaler med eksperter ved AE Nett har vi kommet frem til oppgavens fokus, systemets avgrensninger, kategorisering av linjens komponenter, levetid på komponenter, valg av kostandskategorier etc. Ekspertene kommer hovedsakelig fra Agder Energi Nett, og består av teknisk sjef, fagansvarlige, driftsingeniører, systemansvarlige og rådgivere. Ekspertene utenfor AE Nett bestod for det meste av planleggere, ansatte hos elektroentreprenører, ansatte i REN og forskere fra SINTEF.

Det ble sendt ut et strukturert skjema til utvalgte eksperter i nettbransjen, hvor mottakeren ble bedt om å oppgi forventet minimum, maksimum og normal levetid for de komponentene som ble valgt å ta med i tilstandsvurderingen. Listen med bidrag er ikke omfattende, og det forventes at resultatene kan skille seg betydelig fra virkeligheten.

I den nevnte mailen ble mottakeren også bedt om å fylle ut forventet fordeling av kostnadene forbundet ved et mastepunkt. Dette ble gjort for å kunne vekte de ulike tilstandskarakterene til komponentene i en snittkarakter for den spesifikke linjen som tilstandsvurderes. Det viste seg at svært få kunne bidra med svar på dette punktet, og det ble derfor foretatt et valg om å basere seg på kostnader og kostnadsfordeling slik det forekommer i RENs planleggingsverktøy, da dette brukes aktivt av bransjen og forventes og ha høyere pålitelighet enn våre tall. E-posten med spørreskjema finnes i vedlegg C. Svarene finnes i vedlegg D.

2.2.4 NetBas

NetBas er et nettinformasjonssystem (NIS) som er utviklet av POWEL ASA. NetBas er et GIS-basert nettinformasjonssystem. Relevant informasjon om komponenter og anlegg finnes i det sentrale nettarkivet i NetBas. Dette benyttes i integrerte simulerings- og analyseverktøy. Resultat og data presenteres etter behov i kart, grafer, linjediagram eller i lister og oppslag. Databasen i NetBas inneholder blant annet tekniske data om kraftlinjer, kabler, transformatorer, kondensatorbatterier, samt data for produksjon og last under ulike lasttilfeller [8].

Dataene som ble hentet ut fra NetBas gjelder hovedsakelig informasjon om mengde, type og plassering av de ulike komponentene. Det er snakk om antall stolper, hvilket konstruksjonsmateriale disse har, og deres geografiske plassering, samt den samme informasjonen om linene. Informasjonen i NetBas er begrenset da det kun finnes informasjon om line og mast. Det finnes kun begrenset data på underkomponentene, som hovedsakelig handler om materialtype på traversen i stolpen. Der det er nødvendig har vi derfor valgt å foreta tilnærminger for å utlede informasjon om underkomponenter.

Vedlikeholdsmodulen som benyttes for datainnsamling i tilstandsvurderingen har også blitt benyttet for å hente ut informasjon. Den 17. april ble linjen som grener av fra hovedlinjen Augland-Sødal til Skråstadvarden tilstandsvurdert av AE Nett og oppgavens forfattere. Dataene fra denne befaringen har blitt benyttet i oppgaven for å kunne komme med eksempler på bruk av fornyelsesvurderingsprosessen.

2.2.5 FASIT

Dataene som omhandler feilinformasjon er hentet ut fra AE Netts FASIT-database. Denne inneholder informasjon om alle registrerte feilsituasjoner fra 1. januar 2001 og frem til 31. desember 2014. Feilene registreres av vakthavende på nettsentralen og føres inn i et standardisert skjema. Skjemaet ligger i vedlegg A.

2.3 Datakvalitet

Datakvalitet er et mål på hvor velegnet et datamateriale er til å belyse en problemstilling [9]. Siden kvaliteten på datamaterialet måles relativt opp mot problemstillingen det skal belyse, vil kvaliteten variere med problemstillingen. Vi må derfor dømme de enkelte dataene ut fra konteksten og beskrive omgivelsene for å kunne fastslå kvaliteten [9].

2.3.1 Reliabilitet

Påliteligheten, eller reliabiliteten, av et resultat er høy hvis man ved senere anledninger oppnår det samme resultatet fra det samme datasettet under de samme betingelsene. I praksis vil man aldri oppnå helt like resultater fra måling til måling. Har resultatene lav variasjon kan man derfor likevel ha høy reliabilitet. Reliabilitet handler derfor om vi kan stole på at de målingene vi har foretatt er riktige [10].

I kvantitativ forskning skiller man mellom *tilfeldige* og *systematiske* målefeil, hvor de tilfeldige feilene vil variere rundt et gjennomsnitt, og de systematiske feilene vil vise en klar helning mot en for høy eller lav verdi [10]. Høye systematiske feil tyder på at målemetoden fører til en predisposisjon for å velge enkelte alternativ. Dette er et symptom på lav pålitelighet. Målemetoder med høy pålitelighet vil i lavest mulig grad påvirke de innsamlede data [9].

Et eksempel på bruk av en metode med lav reliabilitet i denne oppgaven er spørreskjemaet som ble sendt ut til eksperter i nettbransjen (vedlegg C). Her ble eksperten bedt om å fylle inn sin forventning til minimum, maksimum og normal levetid for ulike komponenter. Vi valgte her å skrive inn vårt eget forslag til aldersfordeling i tabellen. Det kan tenkes at respondenten ble påvirket av dette, og at det i høyere grad ble valgt verdier som liknet på de allerede foreslåtte verdiene. Dette valget ble tatt for å øke svarsansynligheten, og for å muliggjøre kommentering av våre forslag. Hensikten med oppgaven er ikke å lage korrekte levetidsmodeller, og det blir påpekt flere steder i oppgaven at påliteligheten av det nåværende tallmaterialet for levetidsmodellene ikke er høy.

Eksempler på bruk av kilder med høy reliabilitet er feilstatistikken fra FASIT-programmet. Dette er et kvalitetssikret program som reguleres av myndighetene. Alle feilsituasjoner noteres i FASIT-databasen, og det kan derfor antas at påliteligheten av disse dataene er høy.

En del av de kvantitative dataene, slik som for eksempel antall av de ulike komponenttypene, gir grunnlag for usikkerhet i dataene da det har måttet bli foretatt tilnærminger. Feilstatistikken er også

begrenset i form av antall år man har samlet inn og hvor mye data som er tilgjengelig. Blant annet så inkluderer ikke feilstatistikken alderen på komponenten som feiler, og det har derfor blitt gjort avveininger i forhold til den aldersfordelte feilfrekvensen. Datasettene med linjer og stolper inneholdt også mangler i enkelte informasjonsfelt, slik som for eksempel byggeår. Dette gjaldt dog under 10 % av elementene i hvert datasett. Disse elementene ble gjennomgått i samråd med ingeniørene ved AE Nett for å finne sannsynlige byggeår. Disse tilnærmingene er en kilde til noe usikkerhet, men av neglisjerbar størrelse, spesielt for denne rapportens formål.

Stabilitet omhandler graden av samsvar mellom to undersøkelser, gitt bruk av samme undersøkelsesopplegg for å undersøke et fenomen, men foretatt på ulike tidspunkt. Oppnår man høy grad av like resultater på de ulike tidspunktene kan dataene sies å ha høy pålitelighet. Undersøkelsesopplegget har da stabilitet over tid [9].

Ekvivalens omhandler graden av samsvar mellom to uavhengige undersøkelser, gitt samme undersøkelsestidspunkt og samme undersøkelsesopplegg, men gjennomført av to ulike observatører. Det vil si at det oppnås høy ekvivalens om dem som gjennomfører undersøkelsen oppnår like resultater, uavhengig av sin person [9].

Vi kan også snakke om ekvivalens når det gjelder måling av resultater ut fra indikatorer. Når to ulike indikatorer indikerer samme resultat vil det tilsi høy reliabilitet i form av ekvivalens [9]. Indikatorerne som benyttes for å bestemme tilstanden på komponentene som bedømmes er ikke testet som en del av oppgaven, og vi kan derfor ikke gi en egen vurdering av reliabiliteten til disse indikatorerne. På den annen side er disse indikatorerne stort sett hentet fra Energi Norges tilstandshåndbok, og RENs vedlikeholds-dokumenter, og man kan derfor anta høy reliabilitet.

Terje og Syvert (eksterne veiledere) er godt kjent for begge forfatterne av oppgaven. Dette er et moment som kan påvirke påliteligheten av informasjonen fra disse informantene i negativ retning. Vi har imidlertid sammenlignet denne informasjonen opp mot andre kilder, både internt i AE Nett og eksternt, for å sikre høy pålitelighet av den innsamlede informasjonen. Slike metoder kalles triangulering og er med på å kvalitetssikre informasjon [6].

2.3.2 Validitet

Validitet, eller gyldighet, er et mål på om resultatene fra en måling er relevante for det som undersøkes. Høy validitet tilsier at vi undersøker de fenomener som faktisk berører problemstillingen [9].

Bruken av kvalitativ datainnsamling fører til høy grad av validitet. Dette er fordi dybdeintervjuer, åpne spørsmål og diskusjoner muliggjør at flere sider av et fenomen undersøkes, og at informasjonen vi er ute etter kommer frem. En kvantitativ metode vil ikke på samme måte kunne fange nyansene i datagrunnlaget. I samtaler med eksperter fra AE Nett har vi kommet frem til blant annet typiske feilmekanismer og tilstandsbedømminger av komponenter. Denne informasjonen antas å ha høy grad av validitet, da informantene har lang erfaring fra bransjen og har bred kompetanse.

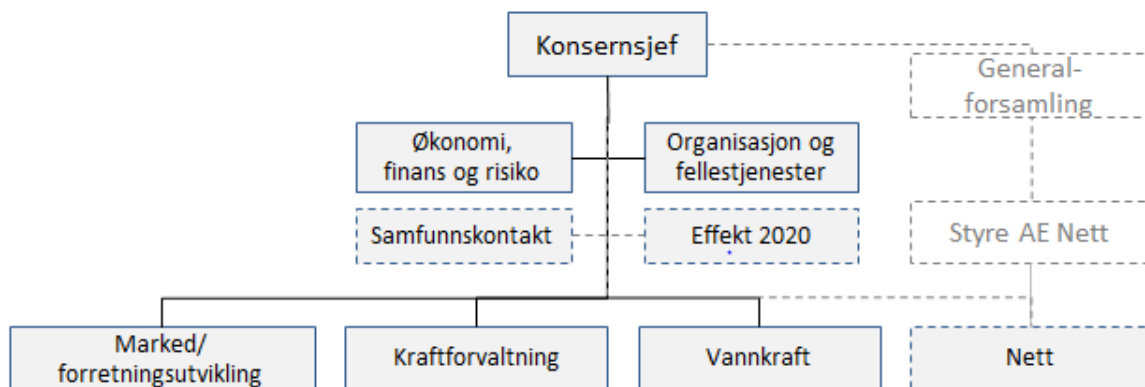
Nettselskapene er på grunn av myndighetsreguleringen og blant annet samarbeidet gjennom REN, relativt like når det kommer til arbeidsoppgaver, utfordringer, rammebetingelser og fokusområder. Koordinering av forskningsprogrammer gjennom Energi Norge og kravet om at forskningsmidler tildelt utenfor inntektsrammen må føre til åpne forskningsresultater, fører også til at det som forskes

på i den norske nettbransjen stort sett er resultatet av felles problemstillinger. Resultatene fra denne rapporten forventes derfor å kunne overføres til andre norske nettselskaper med mindre justeringer. Forskjeller i betingelsene for vår konstruksjon kan være ulike materialtyper, organisering og klimatiske og geografiske utfordringer, men rammeverket er stabilt.

Kapittel 3: Om Agder Energi Nett

Agder Energi Nett er Norges fjerde største nettselskap med 188 000 kunder og totalt 19 400 km med linjenett. Nettselskapet har konsesjon for hele Agder og inngår i Agder Energi-konsernet som eies av Agder-kommunene og Statkraft Holding. AE Nett eier og har driftsansvaret for det elektriske regional- og distribusjonsnett i begge Agder-fylkene.

Agder Energi Nett inngår i Agder Energi-konsernet og er en autonom enhet som styres gjennom selskapets generalforsamling og styre. Figur 3-1 viser konsernets hierarkiske struktur.



Figur 3-1: Agder Energi Konsernstruktur

All informasjon om Agder Energi Nett, samt tilhørende strategi, er hentet fra forretningsplanen 2015-2018 [11]. Dagens metoder for fornyelsesvurdering er hentet fra intervjuer med Terje Taraldsen.

3.1 Markeds-, produkt- og tjenestetilbud

Agder Energi Netts oppgave, som monopolist og konsesjonshaver med områdekonsesjon definert av regulator, knytter seg primært til omforming, overføring og fordeling av elektrisk energi til nettselskapets kunder.

Områdekonsesjonen pålegger AE Nett å levere elektrisk energi til kundene innenfor det geografiske området konsesjonen gjelder for. AE Nett har med konsesjon for nettanlegg plikt til å tilknytte nye anlegg for produksjon av elektrisk energi og nye anlegg for uttak av elektrisk energi, og om nødvendig investere i nettanlegg. Plikten gjelder også ved produksjons- og forbruksøkninger som medfører behov for investeringer i nett.

AE Nett er med dagens organisasjon og egen nettsentral godt rustet for å skalere opp og styrke sin posisjon. AE Nett har som formål å være en pådriver og posisjonere seg for å ta en ledende rolle i den restruktureringen som forventes å komme. Agder Energi ønsker å oppnå rollen som DSO (distribusjonssystemoperatør). For å oppnå en rolle som DSO må AE Nett arbeide for å være på topp med hensyn til effektivitet og leveringssikkerhet.

AE Nett har som formål å øke verdiskapningen gjennom offensiv bruk av teknologi, kundeorientering og forretningsutvikling. Et annet formål for å oppnå økt verdiskapning er økt kompetanse og utvikling

av nye forretningsmodeller for utbygging av fornybar energi, samt effektivt ressursbruk og kontinuerlig forbedring.

3.1.1 Eksterne utviklingstrekk

Kraftsystemet og energibransjen er i endring. Agder Energis konsernstrategi adresserer sentrale eksterne utviklingstrekk for AE Nett, blant annet forventet endring i kundeadferden som følge av flere faktorer, økt digitalisering og innføring av nye automatiske strømmålere (AMS), samt en ny sentral for måledata som vil legge til rette for at kunden får økt informasjonsgrunnlag. Økning i desentral, småskala kraftproduksjon medfører at tidligere passive kunder blir mer aktive som både forbruker og småprodusenter. I tillegg vil flere effektkravende komponenter, som for eksempel elbiler, tas i bruk i tiden fremover. Det vil kreve betydelige investeringer i nett for å bedre effekttilgangen.

AE Nett vil i planperioden særlig påvirkes av følgende forhold:

- Økning i kundenes effektbehov
- Utrulling av smarte målere (AMS)
- Daglig rapportering av kundenes forbruk
- Rolleforskyvninger av kundekontrakter fra nett til ny «Elhub» og kraftleverandører.
- Ny produksjon (grønne sertifikater)

3.2 Sentrale knapphetsfaktorer

Agder Energi konsernet vil under planperioden ha begrenset kapitaltilgang i forhold til konsernets investeringsmuligheter. Dette vil utfordre AE Netts investeringsrammer og blir dermed også en knapphetsfaktor. Ettersom regulator (NVE) fastsetter rammer for selskapets inntekter med betydelige insentiver (både positive og negative), vil AE Nett sitt økonomiske resultat i stor grad påvirkes av selskapets relative effektivitet målt opp mot andre nettselskap.

Selskapets konkurranseutsatte driftsform medfører at virksomheten er svært avhengige av at det er et reelt marked med tilstrekkelig antall underleverandører, i tillegg til at underleverandørens kapasitet oppfyller AE Nett sine behov.

3.3 Strategi

Hovedoppgaven for planperioden 2015-2018 er å omgjøre gode forutsetninger til tilsvarende måltall, slik som:

- HMS – Nullvisjon om personskader (AE Nett + leverandør)
- Effektivitetsmål – På pallen blant de 10 største nettselskapene
- Endrede rammebetingelser – Offensiv og proaktiv tilnærming
- Kapitalbinding – Utsette investeringer og teknisk vedlikehold der dette er mulig
- Leveringspålitelighet – Forbedring av dagens nivå

Fokusområdene i forretningsplanen vil blant annet være at AE Nett skal være slank og kompetent, og benytte markedet til å løse de fleste oppgaver. AE Nett skal ha en bedriftskultur som preges av kontinuerlig effektivisering av arbeidsprosesser (internt/mot kunder/leverandører). I tillegg ønsker AE

Nett å «[...]systematisk øke levetiden på nettet, og vektlegge «godt nok» i nyinvesteringer, vedlikehold og drift[...]», noe denne oppgaven i stor grad vil omhandle.

3.3.1 Strategiske virkemidler

AE Nett har utarbeidet interne- og nettrelaterte prosesser som skal hjelpe med å oppnå de strategiske målene. De interne prosessene omhandler blant annet bruk av *kontinuerlig forbedring* (Lean), hvor det skal stilles krav til å etablere en kultur som raskt og kontinuerlig iverksetter og henter ut nytte av forbedringstiltak. I tillegg skal det utarbeides en formålstjenlig *risikostyringsmodell* som skal være tilpasset AE Netts behov.

De nettrelaterte prosessene omhandler blant annet bruk av *Smart Grid* (inkludert AMS), hvor AE Nett ønsker å anvende ny teknologi og informasjonen fra AMS for å minimere kapitalbindingen og effektivisere driften (Nettnytte). Det skal også rettes et økt fokus på *redusert investeringsbehov* i nettet ved bruk av systematiske, kompetansebaserte og dokumenterte risikoanalyser. Det skal legges vekt på å *spisse vedlikehold og utvikling* av nettet ved at AE Nett skal rette seg inn mot tiltak som gir konkrete nytteeffekter i forhold til sikkerhet, drift og styring av nettet (herunder forenkling av nettstrukturen). I tillegg skal AE Nett *øke forutsatt levetid på anlegg* (med minst 10 år) ved økt komponentvedlikehold og systematisk tilstandsvurdering før reinvestering gjennomføres.

3.3.2 Helse, miljø og sikkerhet

AE Nett skal alltid prioritere Helse, Miljø og Sikkerhet (HMS). Personssikkerhet skal ha høyeste prioritet i selskapet og AE Nett har blant annet visjon om null ulykker og lavt sykefravær som mål. Arbeidet med HMS skal oppleves som et samarbeidsprosjekt mellom leder og medarbeider. Til slutt skal det også inngås gode samarbeid med AE Netts leverandører for å oppnå «HMS og Kvalitet over hele linja».

3.4 Dagens situasjon og metode

Høsten 2014 ble en prototype for fornyelsesvurdering utviklet av Agder Energi Nett. Denne fornyelsesvurderingen var en del av en prosess som hadde som hensikt å vurdere fornyelse eller fortsatt vedlikehold på dårlige linjer. Det er dette prosjektet som danner grunnlaget for denne oppgaven. Ønsket om en mer systematisk og etterprøvbar prosess for vurdering for å kunne øke levetiden på anlegg er en viktig faktor i dette prosjektet.

3.4.1 Organisering og budsjett

Avdelingen ved Agder Energi Nett som har ansvar for vedlikehold av distribusjonsnettet får avsatt et budsjett av ledelsen i AE Nett. Det betyr at kostnadsrammen er gitt og at vedlikehold må prioriteres innenfor denne rammen. Dette er et tiltak som skal sørge for fornuftig bruk av midler og god kostnadskontroll. Ved innføring av systematiske metoder for vedlikehold, hvor effektiviteten av vedlikeholdssystemene kan bevises, åpnes det for større kostnadsrammer.

3.4.2 Vedlikeholds- og fornyelsespraksis

En av utfordringene ved dagens situasjon er den aldrende infrastrukturen. Det er mange linjer som nærmer seg forventet teknisk levetid, og systemer for prioritering og vedlikeholdsstyring blir derfor viktige for å kunne drifte nettet effektivt uten for høye selskaps- og samfunnskostnader.

En del av dagens vedlikeholdssystem er lovpålagte og periodiske inspeksjoner og befaringer. Inspeksjoner utføres årlig og er en enkelt tilstandskontroll for å oppdage overfladiske avvik.

Befaringene er grundigere og utføres hvert femte år. Ved befaringskontrolleres blant annet råte, korrosjon, sprekkdannelse etc. for å avdekke tilstander som ikke oppdages ved inspeksjon. Hvis det ved en periodisk tilstandskontroll oppdages at linjen er dårlig blir det foreslått fornyelsesvurdering av linjen.

3.4.3 Hvordan foregår fornyelsesvurderingen

Figur 3-2 viser AE Netts fornyelsesvurderingsprosess. I førsteomgang skal triggerkriterier trigge fornyelsesbefaring av aktuell linje. Det er utviklet prosedyre for triggerkriterier som per i dag er basert på subjektiv vurdering. Etter at aktuell linje er valgt foretar man en fornyelsesvurdering. Dette skjer gjennom tre trinn [12]:

I trinn 1 befares den aktuelle linjen. Ved hjelp av vurderingsskjema (penn og papir) og diverse verktøy (råtebor, hammer, kikkert) avdekkes og registreres tilstanden til de aktuelle komponentene for hvert enkelt mastepunkt.

I trinn 2 registreres og sammenstilles tilstandskarakterene ved bruk av Excel. Det blir foretatt en beregning av et gjennomsnitt for hver komponenttype, som så blir vektet mot en prosentfordeling som angir økonomisk verdi av komponenttypen på linjen. Totalkarakteren beskriver tilstanden til linjen.

I trinn 3 blir resultatene vurdert opp mot risikofaktorer og kostnader av tiltak for å bestemme om linjen bør fornyes eller ikke. Ved fornyelse blir linjen lagt i en prioriteringsliste for fornyelse de neste fem år (NUP). Hvis fornyelse ikke velges vil linjen tilbakeføres til normalt befaringsintervall og vedlikehold, hvor eventuelle tilstandskontroller i senere tid vil trigge ny fornyelsesvurdering.

3.4.4 Tilstandskarakterer

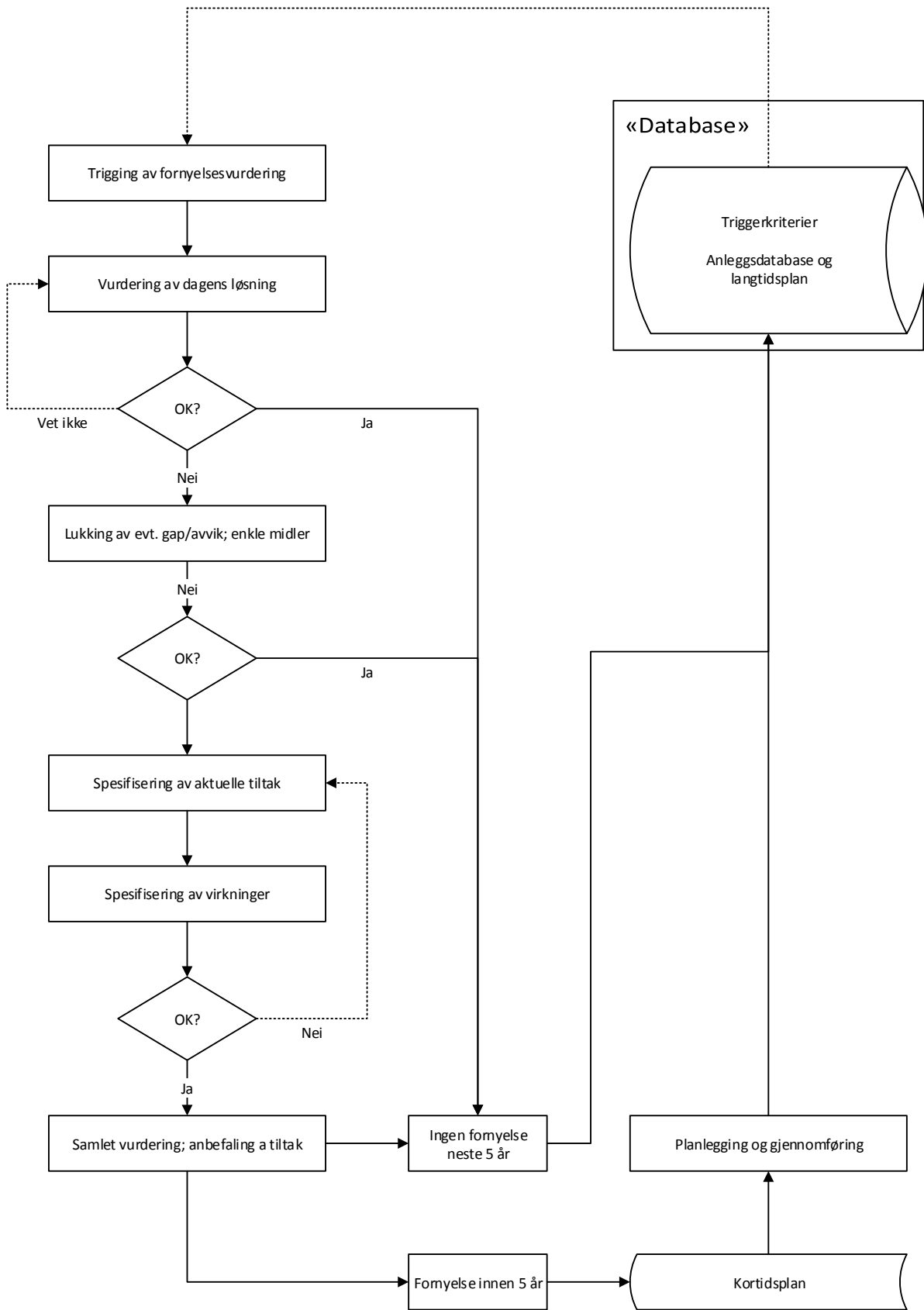
I AE Netts prosess blir tilstandskarakterene gitt sammen med en foreslått utskiftningstid. Det betyr at karakterene ikke knyttes opp mot målbare faktorer, men heller en vurdering av den befarende på hvor lang restlevetid komponenten har.

3.4.5 Valg av tiltak

Valg av tiltak ved fornyelsesvurdering av linjen baseres på linjens totale tilstandskarakter, erfaringer med linjen, og risikofaktorer som KILE-kostnad, HMS, omdømme etc. Det blir tilsynelatende utført enkle kostnadsoverslag for eventuelle tiltak. Avdelingsleder er ansvarlig for å gjennomføre beslutningen basert på funnene fra fornyelsesbefaringen.

3.4.6 Tilgjengelighet av data

Alle dokumenter blir lagret i AE Netts arkivsystem (eDocs), hvor dokumentene merkes med et identifikasjonsnummer og linjeidentifikator. All informasjon fra fornyelsesbefaring fylles ut på ark, og det er derfor nødvendig å skanne arkene for at de skal lagres digitalt. Dokumentene fra fornyelsesbefaringen er tilgjengelige for AE Netts ansatte via arkivsystemet.



Figur 3-2: Dagens fornyelsesvurderingsprosess [12]

3.5 Myndighetsorganisasjoner

Myndighetsorganisasjoner er her definert som de organisasjonene som har innvirkning på Agder Energi Nett. Det er først og fremst de organisasjonene som er en del av statsforvaltningen, som har lovbestemt reguleringsmyndighet, men også organisasjoner som er de facto-myndighet gjennom deres betydning for nettbransjens valg av metoder.

3.5.1 Norges Vassdrags- og Energidirektorat (NVE)

Norges Vassdrags- og Energidirektorat (NVE) er underlagt Olje- og energidepartementet (OED) og har ansvar med å forvalte vann- og energiresursene i Norge. NVEs tilsynsrett ovenfor nettselskapene er hjemlet i energiloven. NVE har ansvaret med å regulere nettselskapene i Norge og utarbeider regulerende forskrifter for bransjen. [13]

3.5.2 Direktoratet for Sikkerhet og Beredskap (DSB)

Departementet for Samfunnssikkerhet og Beredskap (DSB) er underlagt Justis- og beredskapsdepartementet og har ansvar på en rekke samfunnstrygghetsområder – blant annet elsikkerhet. DSB har utarbeidet Forskrift for elektriske forsyningsanlegg (FEF), med formål om å regulere prosjektering, utføring, drift og vedlikehold av elektriske forsyningsanlegg slik at disse ikke utgjør en fare for liv, helse og materielle verdier. [14]

3.5.3 Rasjonell Elektrisk Nettvirksomhet AS (REN AS)

Rasjonell Elektrisk Nettvirksomhet AS (REN AS) er et standardiseringsselskap som eies av 61 norske nettselskap, og omfatter samtlige norske distribusjonsselskap i sin medlemsbase. Formålet med selskapet er å standardisere anleggsløsninger og arbeidsmetoder på tvers av nettselskapene for å øke kostnadseffektivitet og imøtekomme krav fra myndighetene. Agder Energi Nett AS er nest største aksjeeier i REN AS [15]. REN AS er ingen direkte myndighetsorganisasjon, men retningslinjer som utarbeides av denne organisasjonen regnes for å være bransjestandard i Norge. Det som blir fastsatt i REN-komiteene og -arbeidsgruppene har derfor stor innvirkning på nettselskapenes arbeidsmetoder og retningslinjer. REN samarbeider også i stor grad med myndighetene gjennom DSB.

Standardbeskrivelser finnes i form av «REN-Blad». Dette er tekniske håndbøker innenfor prosjektering, montasje, vedlikehold og drift, som angir metoder og materialer som bør benyttes. Alle standarder oppfyller kravene i Forskrift om elektriske forsyningsanlegg (FEF) og Forskrift om sikkerhet ved elektriske anlegg (FSE). REN-Bladene blir utarbeidet i arbeidsgrupper som består av eksperter fra nettselskapene og andre relevante bedrifter i bransjen. REN-Bladene deles opp i serier basert på hvilket fagområde som dekkes. For denne oppgaven er det særlig bladene i 2000-serien, «Høyspenning Luft», som er aktuelle. AE Nett deltar aktivt i arbeidsgruppene som utarbeider REN-bladene. [15]

Kapittel 4: Grunnleggende teori og metodikk

Mens vi i kapittel 2 beskrev det grunnleggende rammeverket for forskningskonstruksjon skal vi i dette kapitlet gjennomgå nødvendig teori og verktøy for å kunne løse problemstillingen i oppgaven. Kapitlet gjennomgår først det høyspente distribusjonsnett som beskriver selve systemet og komponentene som utgjør systemet. I delkapittel to gjennomgås de statistiske metoder og den sannsynlighetsregning som inngår i oppgaveløsningen. Deretter gjennomgås grunnleggende statistikk, samt den matematikken som benyttes til modellering av stokastiske variabler og beregning av sviktintensitet og pålitelighet. Beskrivelse av Monte Carlo-metoden kommer etter dette. Neste del av teorikapitlet omhandler risikobegreper. Deretter presenteres verktøy for risikoanalyse. De tre neste kapitlene omhandler preventivt, kurativt og pålitelighetsbasert vedlikehold. De to siste kapitlene omhandler pålitelighetsdata og økonomi.

4.1 Beskrivelse av høyspent distribusjonsnett

Et høyspent luftnett har som oppgave å lede strøm mellom transformatorstasjonene som er knutepunktene mellom distribusjonsnett og regionalnett, og nettstasjonene som er knutepunktene mellom det høyspente og lavspente distribusjonsnett. Luftnettet består av strømførende liner og mastepunkt som skal bære denne linen. Luftnettet er utsatt for skader og aldring da det befinner seg i friluft uten nevneverdig beskyttelse. Det er derfor store utfordringer forbundet med materialvalg, plassering, vedlikeholdsrutiner etc. for å sikre optimal levetid på luftnettanleggene. Anleggene er særlig utsatt for vær, lyn, vind, snø, is og trefall.

I dette kapitlet vil det gjennomgås luftnettets funksjon, hvilke komponenter det består av og hvilke feilingsmekanismer som er spesielt forekommende.

4.1.1 System

Et strømførende nettverk av liner, kabler, transformatorer, brytere, målere etc. er et komplisert system. Det består av mange ulike komponenter, i ulike materialer, med forskjellige feilingsmekanismer, ulike levetidsforventninger og så videre. Det er derfor viktig å kunne dele opp komponentene for å lette oversikten.

Komponentene som inkluderes i denne oppgaven begrenser seg til de typiske komponentene i et høyspent luftnett. Det er ikke inkludert komponenter som typisk befinner seg i nettstasjoner, koblingsstasjoner eller lignende. Det høyspente luftnettet begrenser seg til selve linjen inkludert komponentene som har som oppgave å isolere linen fra jord. Eventuelle vern, brytere etc. er ikke inkludert i oppgaveløsningen.

4.1.2 Line

I denne oppgaven defineres linen som hele det strømførende systemet som er linekonfigurasjonen. Linens funksjon er å lede den elektriske strømmen fra start til endepunkt, uten for høye effekttap eller spenningstap. For at dette skal være mulig må lederen være konstruert av et materiale med lav spesifikk motstand, og høy mekanisk styrke. Valg av type ledningsmaterialet avhenger av enhetens pris, mekaniske egenskaper, kjemiske egenskaper, kvalitet på faste og bevegelige flater og montasjeegenskaper. Vanlige ledningsmaterialer er kobber (Cu), stål-aluminium (FeAl) og aluminium (Al), samt andre nyere aluminiumslegeringer. [16]

I en leder som fører vekselstrøm vil strømmen tendere til å bevege seg i lederens ytre lag. Dette skjer fordi det vekslende magnetfeltet inducerer virvelstrømmer som forsterker strømstyrken i lederens ytre lag, og kansellerer den i de indre lagene. Dette fenomenet kalles skinneffekten [17]. Jo høyere frekvens på vekselstrømmen, jo mer tenderer strømmen til å bevege seg i lederens ytre lag. Skinneffekten fører til en reduksjon i lederens effektive tverrsnitt. For å begrense motstanden i lederen er det derfor nødvendig å øke det strømførende arealet. Det strømførende arealet fordeler seg langs overflaten på lederen, så det er denne delen av arealet som må økes. På grunn av den lave strømtettheten i lederens senter er det derfor mulig å bruke billigere materialer med høyere motstand og høyere mekanisk styrke. En line-type som utnytter dette er FeAl-linen, en aluminiumline med stålkjerne, som gir linjen høyere mekanisk styrke. Andre typiske liner er rene kobberledere, aluminiumledere eller stållede, samt ulike aluminiumslegeringer.

For å forhindre overslag til jord eller andre faser er det nødvendig med en viss avstand mellom fasene og objekter koblet til jord. For å redusere denne avstanden – og dermed også redusere beslaglagt areal rundt lederen – belegges ofte nyere linjer med et plastbelegg som øker isolasjonsevnen mot nærgående objekter. Dette isolasjonslaget reduserer avstanden mellom fasene, og gjør også linjen mer motstandsdyktig mot jordslutninger. Linene med slike belegg kalles BLL eller BLX. Bilde 4-1 viser en BLL-linje og en FeAl-linje på 24 kV. Vi ser at faseavstanden er betydelig kortere for BLL-linjen.



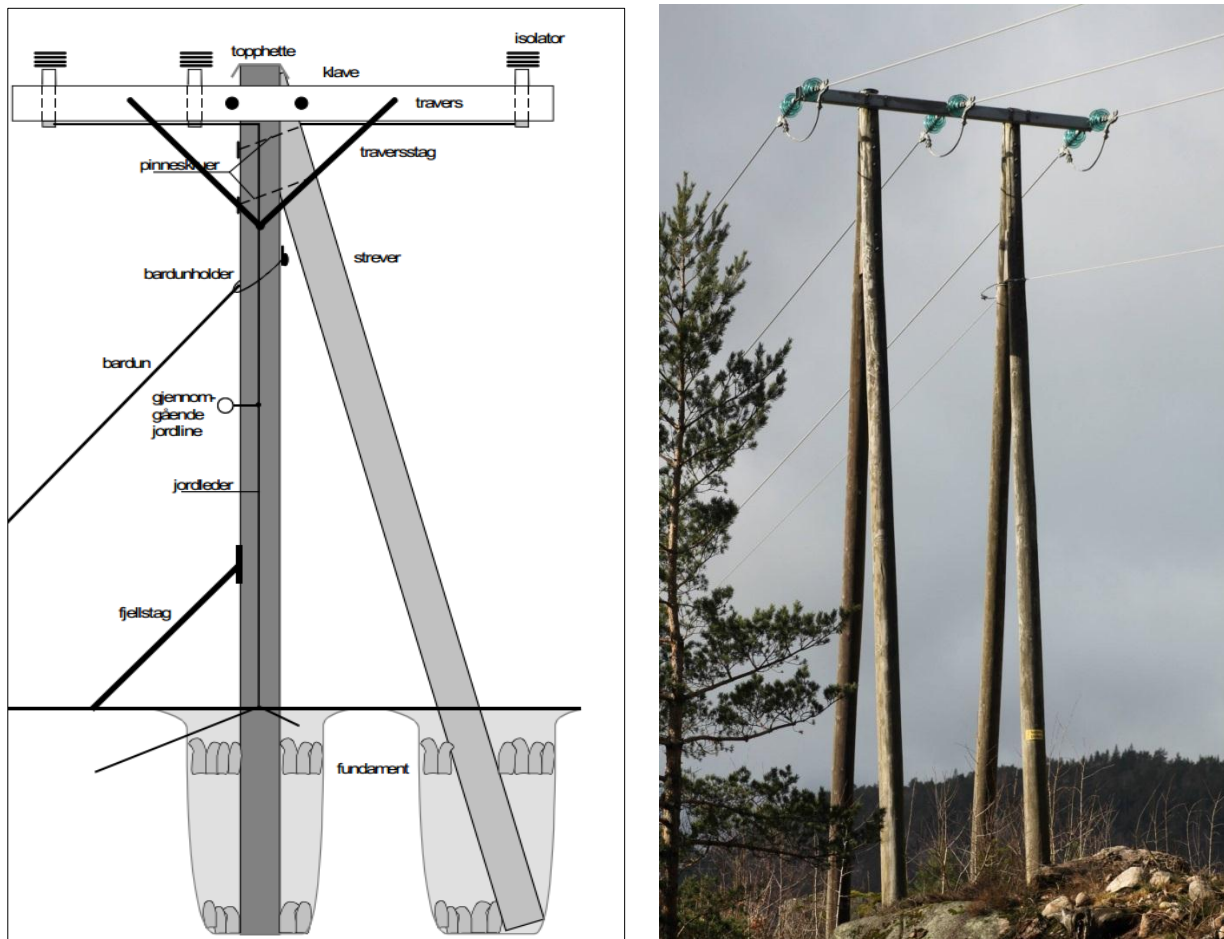
Bilde 4-1: BLL-linje på 24 kV (venstre) og FeAl-linje på 24 kV (høyre)

Vanlige skademekanismer i faselinen er utmatting, korrosjon, trådbrudd, linebrudd, deformasjon etc. Forekomsten av skademekanismene avhenger av klimaet der linjen befinner seg, belastning på linjen, installasjonshåndtering, produksjonskvalitet og lignende. Typiske årsaker er sår i linens overflate, påført enten under montering eller under drift; lysbuesår som følge av serielysbuer eller overslag til jord eller andre faser; ulike korrosjonstyper; elektrisk eller mekanisk overbelastning etc. [7]

4.1.3 Mastepunkt

Mastens oppgave er å bære linjen over jord, for å sikre forskriftsmessig og sikker høyde over terreng, samt avstand til andre objekter. Linjestrekkene er lange, med store areal for vindfangst, og mastene må tåle høye mekaniske påkjenninger for å kunne holde linjen i ønsket posisjon. Det tverrgående beslaget som bærer isolatorene i mastepunktet kalles travers. [16]

Et mastepunkt består av stolpe, travers, bolter, klaver, stag, og eventuelt barduner og fundament. Masten konstrueres vanligvis i tre; bolter, klaver, stag og barduner er i galvanisert stål; og traversen finnes i tre, galvanisert stål og aluminium. Det er dermed ulike materialer i en mast, med ulik levetid og skademekanisme. Figur 4-1 viser konstruksjonen og oppbygning av en tremast og et virkelig mastepunkt. [16]



Figur 4-1: Teoretisk mastepunkt (venstre) [7],
og virkelig mastepunkt (høyre)

Stolpen, som normalt er i tremateriale i distribusjonsnett, må beskyttes fra råte for å bevare den mekaniske styrken. Dette gjøres ved å impregnere stolpen. De mest utbredte impregneringene er henholdsvis kreosot og saltimpregnering.

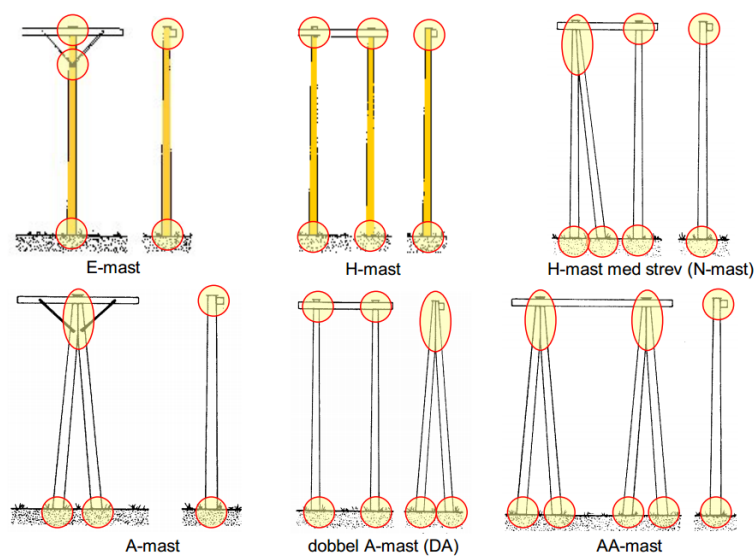
Kreosot er et tjærestoff som i hovedsak består av polysykliske aromatiske hydrokarboner (PAH), fenoler, nitrogen- og svovelbaserte heterosykler. Kreosotimpregnerte stolper er mørke brune eller svarte i fargen, ofte er kreosoten godt synlig. Man kan også kjenne en sterk tjærelukt i nærheten av slike stolper. Kreosotimpregneringen er giftig for sopp og insekter, og er også vannavstøtende. Forskning i nyere tid har påvist at kreosotstoffene også er giftige for mennesker og dyr, i tillegg til å være kreftfremkallende. [18]



Bilde 4-2: Kreosotimpregnert stolpe

Saltimpregneringen inneholder normalt kobbersalter og organiske fungicider. Noen eldre stolper inneholder også krom- og arsenikksalter. Stolper impregnert med kobbersalt har ofte en grønnstjattering i overflaten. [19]. Stålkomponentene beskyttes normalt med galvanisering for å hindre rustutvikling.

En skiller mellom flere forskjellige typer mastekonstruksjoner i distribusjonsnett, blant annet A-mast, E-mast, H-mast med strever (N - mast), DA-mast og AA-mast. Se figur 4-2. I dag benyttes det i hovedsak tremaster til slike konstruksjoner, men tidligere ble også betong og stål brukt. [16]



Figur 4-2: Konstruksjonsløsninger for tremaster. Angrepspunkter for råte er markert med røde sirkler. [7]

Valg av mastetype avhenger av ulike forhold, blant annet korrosjonspåkjenning (stål, aluminium), spenningsnivå, mastehøyde, krav til mekaniske styrke og hvilken funksjon masten skal ha. Man skiller normalt mellom *bæremaster*, *forankringsmaster* og *endemaster*. [12]

Hovedfunksjonen til en *bæremast* er å opprettholde tråden tilstrekkelig høyt over bakken, i tillegg til å holde linjene i stor nok avstand mellom hverandre. En bæremast deles opp etter linjeretning; *rettlinje* eller i *vinkel*. Bæremaster i rettlinje utføres som E- eller H-mast og bæremaster i vinkel utføres som bardunert E- eller H-mast, H-mast med strever, A-mast eller som AA-mast. For bæremaster vil de mekaniske påkjenningene være vekten av ledningene, i tillegg til ekstralaster i form av snø, is og vindtrykk på tvers av linjen.

Hovedfunksjonen til en *forankringsmast* er å opprettholde forankringspunkter, slik at man spenner av linjen i begge retninger. I tillegg skal en forankringsmast fungere som støttefunksjon i områder hvor det trengs ekstra mekanisk styrke.

En *endemast* fungerer som en overgang i enden av linjen - kombinert med trafomast/kabelmast) En endemast tas i bruk i begge endene av en linje, f.eks. overgang fra luftlinje til jordkabel eller der linjen blir ført inn i en stasjon. Det settes store krav til at endemastene må kunne tåle de mekaniske påkjenningene som oppstår på den ene siden av masten.

I tillegg finnes det master med andre typer funksjoner, slik som *avgreningsmaster* og *transformator-master*. En avgreningsmast avgreiner fra hovedlinjen og ut i ny delelinje. Avgreningsmast utføres som E-mast med enkelstolpe, H-mast med strever eller som A-mast. Ved avgrening i vinkelpunkt i hovedlinjen er det forutsatt at avgreningen skjer motsatt rettet vinkeldreining. Her må masten barduneres særskilt både for vinkelen og for avgreningen. Ved annen avgreningsretning i vinkelpunkt må mast og bardunering beregnes særskilt. [12]

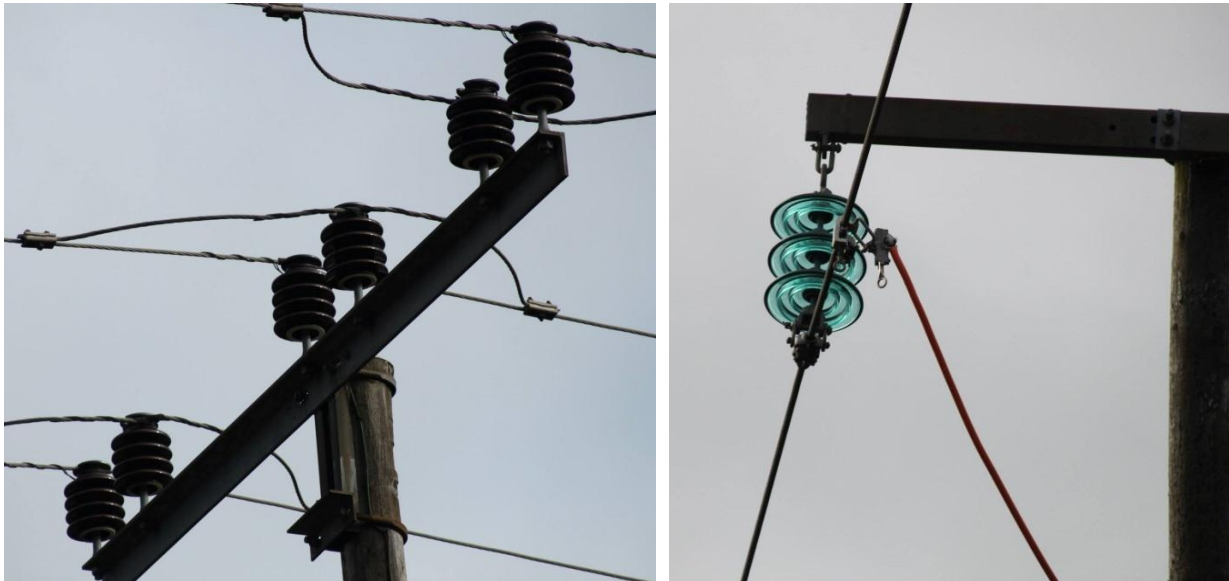
Transformormast utføres normalt som H-mast eller som dobbel A-mast. En transformormast skal ha en bærende effekt for transformatoren som er plassert i masten. Forskriftskrav (FEF 2006) har ført til at all betjening skal kunne opereres fra bakken. AE Nett bygger av HMS-hensyn ikke nye anlegg som transformormast. Andre typer master kan være brytermast (linje-/skille-/lastskillebryter) og kabelmast.

4.1.4 Isolator

Isolatorer kan defineres som isolerende feste- eller støttepunkter for ledere. Isolatormaterialet må kunne tåle elektriske, mekaniske, termiske og klimatiske påkjenninger slik som lysbuer, slag, varme og kulde, fuktighet og saltdrev. I tillegg må de ha gode langtidsegenskaper. [16]

Elektriske feil eller svikt på grunn av isolatoren kan opptre på tre forskjellige måter; Gjennomslag på grunn av feil eller skader i isolatormateriale; Overslag på grunn av overspenninger eller for kort isolasjonsavstand; eller for liten overflateisolasjon slik at det oppstår krepstrømmer. Isolatormateriale har normalt vært av type porselen eller glass, men i dag har komposittmateriale (glassfiberarmert polyester med helstøpt kunstgummikappe) blitt mer vanlig å ta i bruk [12].

Isolatorer i luftnettet finnes enten i form av piggisolatorer, som bærer linens vekt på oversiden av traversen, og er festet via en piggbolt; hengekjeder, som bærer linens vekt på undersiden av traversen, hvor linen «henger» i isolatorkjedene; og strekkjeder som bærer linen på fremsiden og baksiden av traversen, og hvor linen passerer masten i ikke-spente looper. [12]



Bilde 4-3: Porselen piggisolator (venstre) og glass hengeisolator (høyre)

4.1.5 Sviktmekanismer

Tabell 4-1 lister opp de viktigste feilmekanismene for komponentene som har blitt omtalt. Det finnes flere feilmekanismer og -årsaker. Tabellen viser kun et viktig utdrag av disse. Flere feilmekanismer finnes i vedlegg H.

Tabell 4-1: Sviktmekanismer og -årsaker for luftnettkomponenter (Taraldsen & Augland, 2015)

| Komponent | Feilmekanismer | Feilårsaker |
|-----------|----------------------------|--|
| Line | Redusert spenningskvalitet | <ul style="list-style-type: none"> • For høy motstand i line, varmgang • For høy strømføring, overbelastning • Overslag mellom fase og jord eller fase og fase (trefall/vind) |
| | Redusert ledeevne | <ul style="list-style-type: none"> • Avkuttet line (materialsletasje/fremmedlegeme) • Overslag til fase eller jord (fremmedlegeme/vind) |
| | Feil spenn i line | <ul style="list-style-type: none"> • Materialsletasje • For varm/kald line (Overbelastning/underbelastning) |
| Stolpe | Reduser bæreevne | <ul style="list-style-type: none"> • Råte (klima/jordforhold/manglende beskyttelse) • Hakkespett • Lynnedslag • Storm |
| Travers | Redusert bæreevne | <ul style="list-style-type: none"> • Råte (tre) • Korrosjon (stål) • Feilmontering (Dårlig feste av travers etc.) |
| Isolator | Redusert bæreevne | <ul style="list-style-type: none"> • Sprekkdannelse • Feilmontering |
| | Redusert isolasjonsevne | <ul style="list-style-type: none"> • Forurensning av overflate (salt, støv, fremmedlegemer) • Sprekkdannelse • Produksjonsfeil • Overslag |

4.2 Usikkerhet og sannsynlighet

Sannsynlighet benyttes i risikosammenheng for å anslå sjansen for at én eller flere hendelser skal inntreffe. Sannsynligheten for at en hendelse inntreffer og konsekvensene av den er det begrepet vi kjenner som risiko. I risikofagfeltet er det derfor essensielt med en god forståelse for statistikk og sannsynlighet for å kunne forstå og behandle risiko på en god måte.

4.2.1 Grunnleggende sannsynlighet

Den matematiske behandlingen av sannsynlighet handler om å analysere tilfeldige fenomener. Sannsynlighet for et fenomen kan tolkes som sjansen for at den tilfeldige hendelsen skal inntreffe. Matematisk kan vi definere sannsynligheten for at en hendelse, x , skal inntreffe slik [20]:

$$P(x) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{n}{N} \quad [4-1]$$

$$\begin{aligned} P(x) &= \text{Sannsynligheten for hendelse } x \\ N &= \text{Antall hendelser} \\ n &= \text{Hendelser definert som } x \end{aligned}$$

Sannsynlighet er altså et uttrykk for «sikkerheten» av at en hendelse skal inntreffe. Denne verdien kan uttrykkes som et tall mellom 0 og 1, hvor 0 tilsier at hendelsen helt sikkert ikke kommer til å inntreffe, og 1 tilsier at hendelsen helt sikkert kommer til å inntreffe. Summen av alle sannsynligheter innenfor et utfallsrom, Ω , er lik 1 [20]:

$$P(x) \in [0, 1] \quad x \in \Omega \quad [4-2]$$

$$\sum_{x \in \Omega} P(x) = 1 \quad [4-3]$$

Vi kan også definere sannsynligheten for at to ulike hendelser, x og y , skal inntreffe. Dette kalles snitt:

$$P(x \cap y) = P(x|y) * P(y) \quad [4-4]$$

$$P(x|y) = \frac{P(x \cap y)}{P(y)} \quad [4-5]$$

$$\begin{aligned} P(x \cap y) &= \text{Sannsynlighet for at både } x \text{ og } y \text{ inntreffer} \\ P(x|y) &= \text{Sannsynlighet for at } x \text{ inntreffer, gitt at } y \text{ har inntruffet} \\ P(y) &= \text{Sannsynlighet for at hendelse } y \text{ skal inntreffe} \end{aligned}$$

Formel 4-5 er kjent som loven om betinget sannsynlighet, eller Bayes lov. Hvis hendelse x er uavhengig fra hendelse y – det vil si at dens sannsynlighet ikke endrer seg, uavhengig av om y har inntruffet eller ikke – vil vi få [20]:

$$P(x|y) = P(x) \quad [4-6]$$

$$P(x \cap y) = P(x) * P(y) \quad [4-7]$$

Sannsynligheten for at enten x , y eller begge inntreffer, kalt union, uttrykkes slik:

$$P(x \cup y) = P(x) + P(y) - P(x \cap y) \quad [4-8]$$

4.2.2 Stokastisk variabel

En deterministisk variabel har kun ett mulig utfall, den kan altså kun representere én verdi. Dette er lite nyttig i en risikosammenheng, da vi ønsker en mer nøyaktig beskrivelse av virkeligheten. I virkeligheten kan en variabel, for eksempel bølgehøyde, innta et bredt spekter av verdier. For å representere dette benyttes en stokastisk (tilfeldig) variabel. Variabelen tar da hensyn til sannsynligheten for at forskjellige verdier inntreffer, og vil kunne anta ulike verdier hver gang den realiseres [20].

Vi skiller mellom diskrete og kontinuerlige stokastiske variable. Diskrete stokastiske variabler kan ta verdien til et begrenset bestemt antall verdier. Kontinuerlige stokastiske variabler kan ta hvilken som helst verdi innenfor et intervall eller en samling intervaller.

En kontinuerlig stokastisk variabel, t , karakteriseres ved:

$$\begin{aligned} f(t) &= \text{Frekvensfunksjon} \\ \mu_t &= \text{Gjennomsnittsverdi} \\ \sigma_t &= \text{Standardavvik} \end{aligned}$$

Frekvensfunksjonen, eller tetthetsfunksjonen, er den funksjonen som beskriver den relative sannsynligheten for at den stokastiske variable antar en gitt verdi. En frekvensfunksjon skal tilpasses et histogram av reelle datasett, og man må derfor benytte en tilnæringsmetode som ved hjelp av en matematisk funksjon kan representere de reelle verdiene. Det finnes flere ulike frekvensfunksjoner, som har ulike bruksområder ut fra hvilken form datasettet har.

Gjennomsnittsverdien, eller forventningsverdien, μ , er det vektete snittet av alle sannsynlighetene i en datapopulasjon:

$$E(t) = \mu = \int_{-\infty}^{+\infty} t * f(t) dt \quad [4-9]$$

Standardavviket, σ , er et mål på hvor langt fra forventningsverdien vi kan forvente å finne sannsynligheter, altså hvor spredd verdiene i populasjonen er. Standardavviket er lik kvadratroten av variansen:

$$Var(t) = \sigma^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} (t - \mu)^2 * f(t) dt \quad [4-10]$$

4.2.3 Sannsynlighetsfordelinger

En sannsynlighetsfordeling angir sannsynligheten av forekomsten for ulike verdier i en populasjon. Datagrunnlaget for en sannsynlighetsfordeling oppgis som et histogram, som summerer opp forekomsten av verdier i diskrete intervaller. Datapopulasjonen finnes gjerne i en tabell som inneholder informasjon om spesifikke hendelser. Blant annet kan det være en database som inneholder registrerte feil på en enhet, informasjon om nedetid, reparasjonskostnader, antall driftstimer før feil etc.

For å kunne lage en brukbar modell av disse dataene er det nødvendig å tilpasse en funksjon over det ovennevnte histogrammet. Denne funksjonen kalles for en frekvensfunksjon, tetthetsfunksjon eller «Probability Density Function» (PDF). En godt tilpasset frekvensfunksjon vil kunne returnere

resultater som er tilsvarende det vi ville fått i virkeligheten. Den er derfor et godt hjelpemiddel for å kunne forsøke å forutsi hva som kan skje i fremtiden [20].

For å finne sannsynligheten for at t befinner seg i et utfallsrom $[a, b]$ integrerer vi frekvensfunksjonen fra a til b :

$$P(a \leq t \leq b) = \int_a^b f(t) dt \quad [4-11]$$

Hvis vi summerer opp funksjonen til og med variabelen t finner vi den kumulative sannsynligheten, altså sannsynligheten for at t er mindre enn b :

$$P(t \leq b) = F(b) \quad [4-12]$$

Det er ofte dette – et mål på sannsynligheten for at vi befinner oss innenfor en akseptabel grense – som er av interesse sett fra et pålitelighetsperspektiv. Sannsynligheten for at vi overskrider nevnte grense er også av stor interesse:

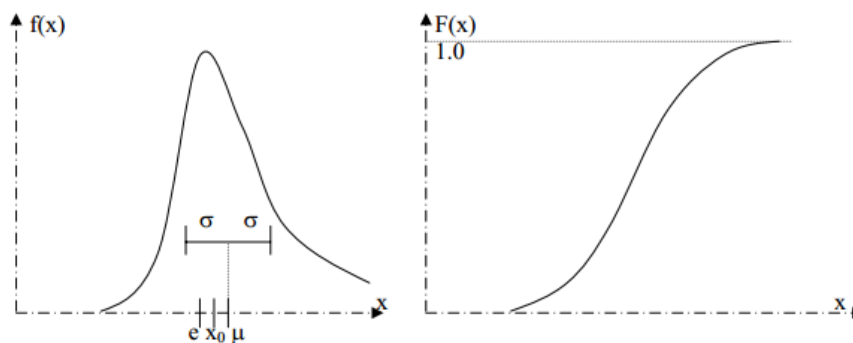
$$P(t > b) = 1 - F(b) \quad [4-13]$$

Den kumulative fordelingsfunksjonen summerer opp sannsynlighetene for alle elementene i et datasett. Den nedre grensen for denne funksjonen vil derfor være 0, og den øvre grensen vil være 1.

$$\lim_{t \rightarrow -\infty} F(t) = 0 \quad [4-14]$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} F(t) = 1 \quad [4-15]$$

Eksempler på frekvensfunksjon og fordelingsfunksjon kan sees i figur 4-3.



Figur 4-3: Frekvensfunksjon og kumulativ fordelingsfunksjon [20]

4.2.3.1 Normalfordeling

En stokastisk variabel har en etablert modell når $f(t)$ er kjent. Den vanligste stokastiske modellen er normalfordelingen (Gauss-kurven), hvor $f(t)$ har en symmetrisk klokkeform:

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} * \sigma} * e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad [4-16]$$

Normalfordelingen er symmetrisk om middelveien, og har like lange «haler» på begge sider av fordelingskurven.

4.2.3.2 Weibull-fordeling

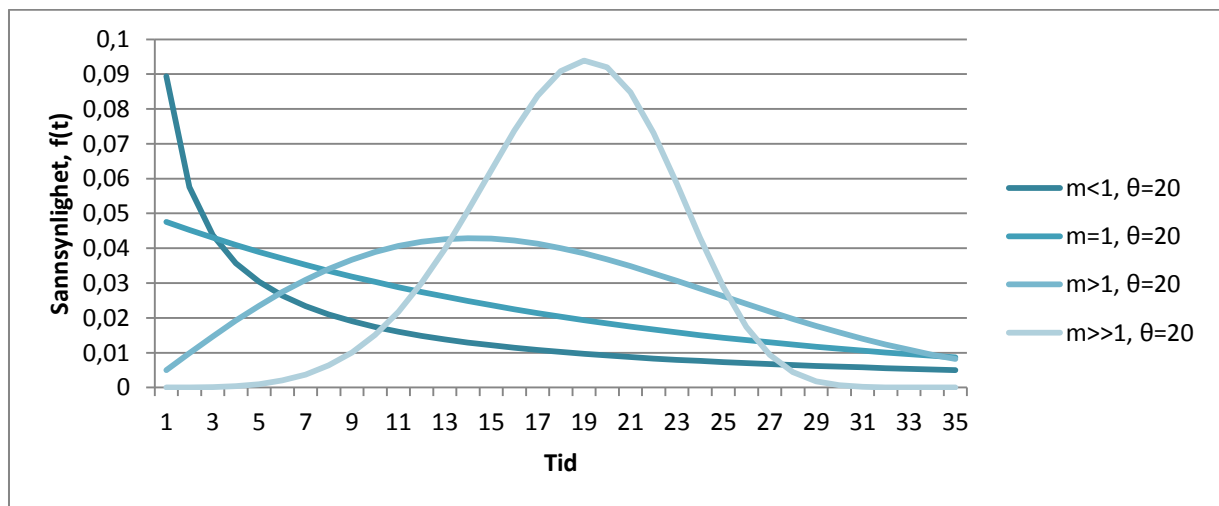
Ettersom Gauss-kurven er symmetrisk stemmer den ikke særlig for mange av de problemene vi støter på i risikoanalyse, da disse ofte har en forskjøvet usymmetrisk fordeling. En god alternativ modell for risikoanalyse er Weibull-fordelingen [20]:

$$f(t) = \frac{m}{\theta} \left(\frac{t}{\theta}\right)^{m-1} e^{-\left(\frac{t}{\theta}\right)^m}, t \geq 0 \quad [4-17]$$

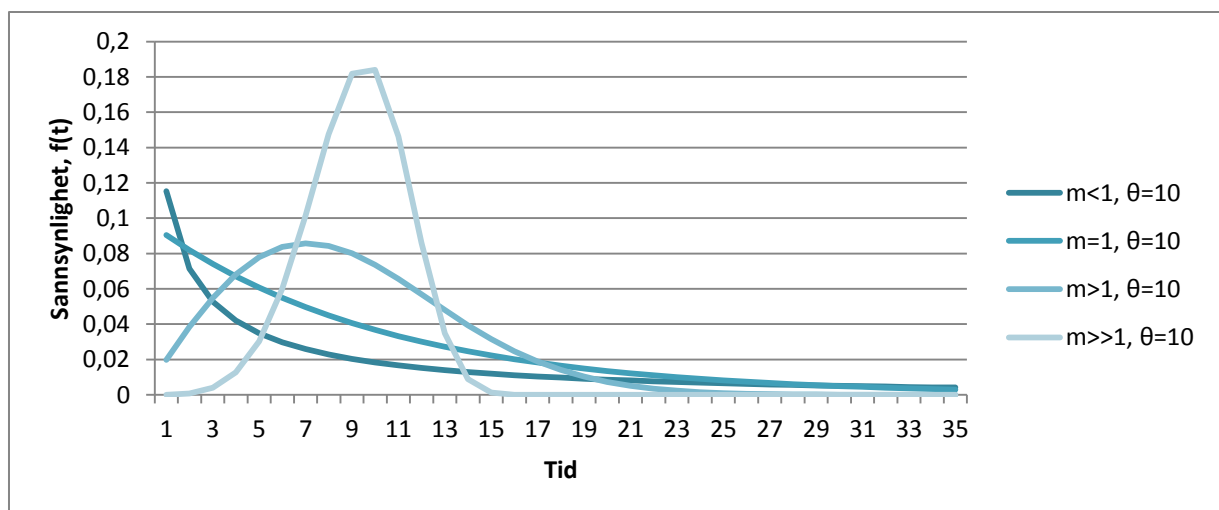
$$f(t) = 0, t < 0 \quad [4-18]$$

m = Formparameter
 θ = Skaleringsparameter

Man velger numeriske verdier for m og θ slik at $f(t)$ passer over histogrammet. Hvis vi endrer m -verdien endres formen på kurven. Hvis vi endrer θ -verdien forskyves kurven langs x-aksen. Se figur 4-4 og 4-5 for eksempler.



Figur 4-4: Ulike Weibull-modeller med variabel m og $\theta = 20$



Figur 4-5: Ulike Weibull-modeller med variabel m og $\theta = 10$

Fordelingsfunksjonen $F(b)$, den kumulative distribusjonsfunksjonen, kan beregnes fra $f(t)$:

$$P(\mathbf{t} \leq b) = F(b) = \int_0^b f(t)dt = \int_0^b \frac{m}{\theta} \left(\frac{t}{\theta}\right)^{m-1} e^{-\left(\frac{t}{\theta}\right)^m} dt = 1 - e^{-\left(\frac{b}{\theta}\right)^m} \quad [4-19]$$

Den komplementære fordelingsfunksjonen, pålitelighetsfunksjonen $R(x)$, finner vi slik:

$$P(\mathbf{t} > b) = R(b) = 1 - F(b) = e^{-\left(\frac{b}{\theta}\right)^m} \quad [4-20]$$

En annen viktig funksjon er sviktintensiteten, definert som sannsynligheten for svikt i løpet av neste tidsintervall Δt , gitt at enheten har overlevd opp til tiden t :

$$P(\mathbf{t} \leq t + \Delta t | \mathbf{t} > t) = \lambda(t) * \Delta t \rightarrow \lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \left(\frac{m}{\theta}\right) \left(\frac{t}{\theta}\right)^{m-1} \quad [4-21]$$

4.2.4 Sviktintensitet

Sviktintensitet er et mål på sannsynligheten for at en enhet feiler i løpet av tidsintervallet Δt , gitt at enheten har overlevd opp til tiden t . Hvis vi definerer T som tiden til svikt vil sviktintensiteten bli gitt av sviktintensitetsfunksjonen $\lambda(t)$ og tidsintervallet Δt [20]:

$$\lambda(t) * \Delta t = P(t \leq T < t + \Delta t | T \geq t) \quad [4-22]$$

Sviktintensitetsfunksjonen kan også uttrykkes ved hjelp av den kontinuerlige fordelingsfunksjonen $f(t)$ og pålitelighetsfunksjonen $R(t)$:

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P(t \leq T < t + \Delta t | T \geq t)}{\Delta t} \quad [4-23]$$

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P(t \leq T < t + \Delta t)}{\Delta t} * \frac{1}{P(T \geq t)} \quad [4-24]$$

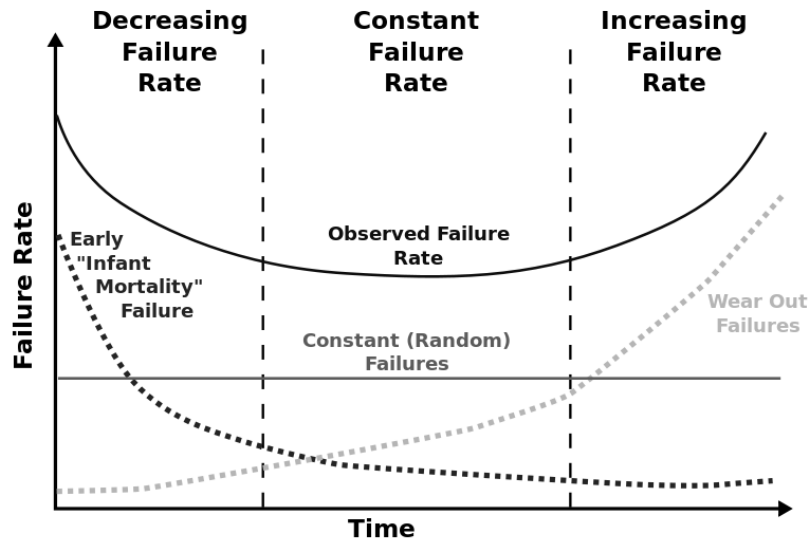
$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad [4-25]$$

Sviktintensitetsfunksjonen angir forventede antall feil som en funksjon av tiden t . For en enhet som er utsatt for slitasje vil sviktintensiteten øke med økende alder. Vi så at for Weibull-fordelingen vil sviktintensiteten beregnes slik [4-21]:

$$\lambda(t) = \left(\frac{m}{\theta}\right) \left(\frac{t}{\theta}\right)^{m-1}$$

Av dette kan vi se at en Weibull-fordeling med $m > 1$ vil gi økende sviktintensitet (IFR). Enheter som er utsatt for slitasje vil alltid ha $m > 1$. For enheter med $m = 1$ vil sviktintensiteten være konstant (CFR). Dette er typisk for tilfeldige feil, da disse kan inntreffe tilfeldig, og ikke er avhengig av enhetens alder. For enheter med $m < 1$ vil sviktintensiteten være avtakende med økende tid (DFR). Dette er typisk for enheter med «barnesykdommer», altså at enheten er utsatt for feil tidlig og at en enhet som varer lengre enn dette vil «bevise» at den er pålitelig.

De tre tilstandene kan vises i «badekarskurven» (figur 4-6). Dette er en generisk fremstilling av en enhets sviktintensitet gjennom enhetens levetid [20].



Figur 4-6: Badekarkurven [21]

4.2.5 Oppdatert pålitelighet

For å oppdatere påliteligheten til et anlegg eller en enhet er det viktig at det lagres historisk data for anlegget eller enheten. Dette medfører at det kan gjennomføres en sammenligning mellom opprinnelige data og oppdatert data.

Det vil være fornuftig å ta i bruk all tilgjengelig informasjon, gammel og ny, objektiv eller subjektiv, i forbindelse med usikre beslutninger. Dette gjelder spesielt når konsekvensen av beslutningene kan ha en stor innvirkning på kostnader.

I forbindelse med estimering av pålitelighet kan man stå ovenfor flere ukjente parametere. Den klassiske statistiske metoden ser på de ukjente parametere som konstante men ukjente, hvor man «gjetter» på verdiene [22].

Den Bayesianske tilnærmingen behandler de ukjente parametere som tilfeldige og ikke-konstante. Før en tar i bruk nåtidens data undersøker man gammel informasjon, subjektive og/ eller objektive vurderinger, for å konstruere tidligere (historiske) distribusjonsmodeller for de ukjente parametere. Modellen uttrykker utgangspunktet for sannsynligheten for de ukjente parametere. Deretter tar man i bruk de aktuelle dataene ved bruk av Bayesianske formler for å utlede en ny posterior-distribusjon for den oppdaterte informasjonen [22].

Fordelen med den Bayesianske metoden er at den tar i bruk tidligere informasjon, men det kan være at tidligere informasjon er unøyaktig, noe som generer støy [22].

Frekvensfunksjonen $f(t)$ og pålitelighetsfunksjonen $R(t)$ er i flere tilfeller modellert på grunnlag av generelle erfaringsdata og/eller opprinnelige feilingsdata. For de ulike komponentene som er i drift, hvor det foreligger tilleggsinformasjon, vil det være en mulighet for å oppdatere den opprinnelige modellen. Normalt vil dette gjelde tilleggsinformasjon om hvor lenge komponentene har stått i drift uten svikt. Sviktintensiteten $\lambda(t)$ blir da [20]:

$$P(t \leq t + \Delta t | t > t) = \lambda(t) * \Delta t$$

[4-26]

Videre kan en undersøke hva påliteligheten $R(t)$ blir for at komponenten overlever ytterligere en tid t_n , gitt at den har overlevd frem til en tid T_0 . Opprinnelig tidsakse er:

$$t = T_0 + t_n \quad [4-27]$$

Dette gir oss:

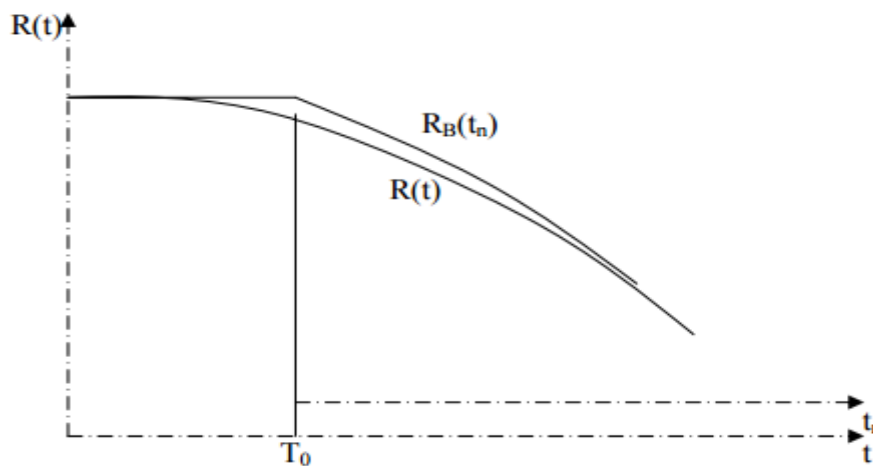
$$P(t > T_0 + t_n | t > T_0) = \frac{P(t > T_0 + t_n \cap t > T_0)}{P(t > T_0)} \quad [4-28]$$

$$P(t > T_0 + t_n | t > T_0) = \frac{R(T_0 + t_n)}{R(T_0)} \quad [4-29]$$

Dette gir en betinget pålitelighet $R_B(t_n)$ fra tiden T_0 , gitt at komponenten har overlevd opp til tiden T_0

$$R_B(t_n) = \frac{R(T_0 + t_n)}{R(T_0)} \quad [4-30]$$

Forløpet av $R_B(t_n)$ er illustrert i figur 4-7.



Figur 4-7: Pålitelighet $R(t)$ og oppdatert pålitelighet $R_B(t_n)$ [20]

I dette tilfellet opererer man kun med to tilstandsverdier: 1,0 og 0,0. Av figuren kan man se at enhetens betinget pålitelighet blir 1,0 frem til T_0 , da en vet at enheten har overlevd frem til tiden T_0 . I tiden etter T_0 synker den oppdaterte påliteligheten $R_B(t_n)$ med en større vinkel i forhold til den opprinnelige påliteligheten $R(t)$.

4.3 Monte Carlo-simulering

Monte Carlo er en simuleringsmetode som tar hensyn til usikkerheten i en beregning, ved å definere parameterne som stokastiske variabler.

En av de store utfordringene i usikkerhetsanalyser er vurderingsprosessen. Her skal usikkerheten knyttet til parameterne brukes til å måle verdien av en beslutningsvariabel, også kalt en utgangsvariabel eller resultatvariabel, $R(Z_n)$. En beslutningsvariabel kan typisk være NPV, LCC eller produksjonsvolum. Basert på regler for tilfeldig trekning genererer simuleringsverktøyet flere datasett av inngangsvariablene (Z_N) med en tilsvarende resultatvariabel (R_N) for hvert av datasettene. Variablene danner grunnlaget for presentasjon av de ulike resultatvariablene i et histogram og videre for beregning av resultatvariabel-verdier for gitte sannsynligheter.

Sammenhengen mellom inngangsvariabelen(e), Z_n , og utgangsvariabelen kan være svært komplisert, for eksempel i situasjoner hvor en forholder seg til variabler med multiple sammenhenger. I slike situasjoner vil MCS være et enkel, robust og anvendelig vurderingsverktøy. [23]

Usikkerheten tilknyttet utgangsvariabelen(e) bør kalkuleres slik at det er mulig å [23]:

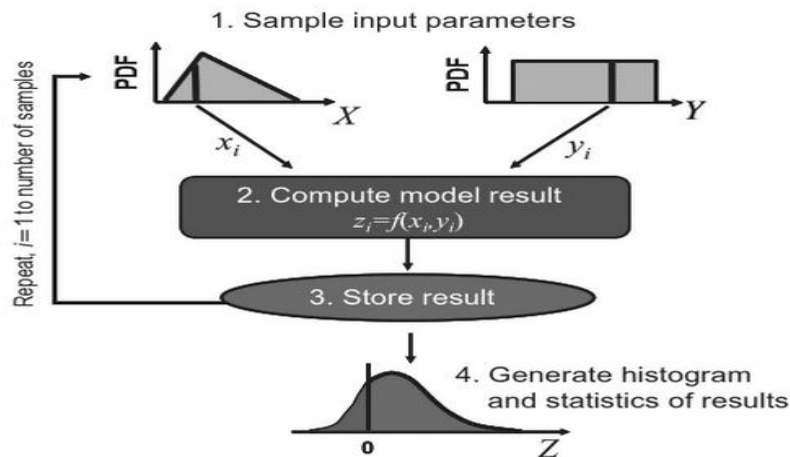
- Beregne prosentiler av beslutningsvariablene slik at de kan gi svar på f.eks. hva er sannsynligheten for at en oppnår en NPV mindre enn 0 kr?
- Beregne forventet verdi (middelverdi, gjennomsnittverdi) av resultatet, særlig i forbindelse ved bruk av ikke-lineære modeller.
- Utarbeide en fullstendig analyse av beslutningsvariabelens sensitivitet for usikkerhet i inngangsvariabelen(e).

MCS varierer alle variablene samtidig, kontra en klassisk deterministisk modell hvor man holder en variabel konstant og varierer de resterende variablene. Dette gir et mer «levende» bilde på usikkerheten tilknyttet beslutningsvariabelen.

4.3.1 Prosedyre og gjennomføring

For å bruke MCS må det i første omgang konstrueres en egnet modell for problemet eller usikkerheten som skal undersøkes. Deretter må usikkerheten knyttet til inngangsvariablene defineres ved hjelp av en sannsynlighetsfordeling. Typiske inngangsvariabler kan være usikkerhet knyttet til kostnader eller lønn. [23]

MCS tar så utgangspunkt i en tilfeldig trekning fra hver av inngangsvariablene og beregner en utgangsvariabel. Prosessen gjentar seg n antall ganger og de lagrede utgangsvariablene for de tilfeldige prøvene registreres og presenteres i et histogram. Videre normaliseres histogrammet for å gi en sannsynlighetsdistribusjon, slik at ulike parametere kan beregnes. Figur 4-8 beskriver gjennomføringen av MSC. Hver enkelt «loop» i modellen - steg én til tre - defineres som en iterasjon og det endelige resultatet av alle iterasjonene av inngangsvariablene og utgangsvariablene defineres som en realisering. [23]



Figur 4-8: Prosedyre for Monte Carlo-simulering [23]

Dersom man tar utgangspunkt i usikkerheten tilknyttet nåverdien av et tenkt investeringsprosjekt, for eksempel gjennomføring av en total utskiftning av et linjestykke, kan man med hjelp av MCS identifisere og beskrive usikkerheten tilknyttet NPV. I tillegg vil man også kunne fremvise hvilke forklaringsvariabler som vil ha størst signifikant påvirkning.

4.3.2 Detaljert gjennomføring

Som nevnt innledningsvis må det i første omgang konstrueres en modell som beskriver den gitte beslutningsvariabelen som skal analyseres. Deretter må en konvertere den deterministiske modellen til en stokastisk modell. For å kunne gjennomføre prosessen er en avhengig av å beskrive usikkerheten i forklaringsvariabelen ved hjelp av en sannsynlighetsdistribusjon. Hver av de usikre variablene blir tildelt sin sannsynlighetsdistribusjon basert på den kunnskapen som er tilgjengelig på det nåværende tidspunkt. [23]

Etter at alle variabler har blitt tildelt sine respektive sannsynlighetsfordelinger gjenstår gjennomføringen av simuleringprosessen. Basert på metoden for tilfeldig trekning trekkes det en tilfeldig variabel ut fra hver av inngangsvariabelens sannsynlighetsdistribusjon. Prosessen for tilfeldig trekning av en sannsynlighetsfordeling foregår som vist i figur 4-9. Deretter foretas det kalkulasjon av et utfall, med utgangspunkt i de tilfeldige variablene. Dette resulterer i én resultatvariabel som tilsvarer én iterasjon. [23]

Modellene er gitt med kumulative sannsynlighetsfordelinger (CDF). Det trekkes en tilfeldig verdi fra fordelingen ved bruk av følgende formel:

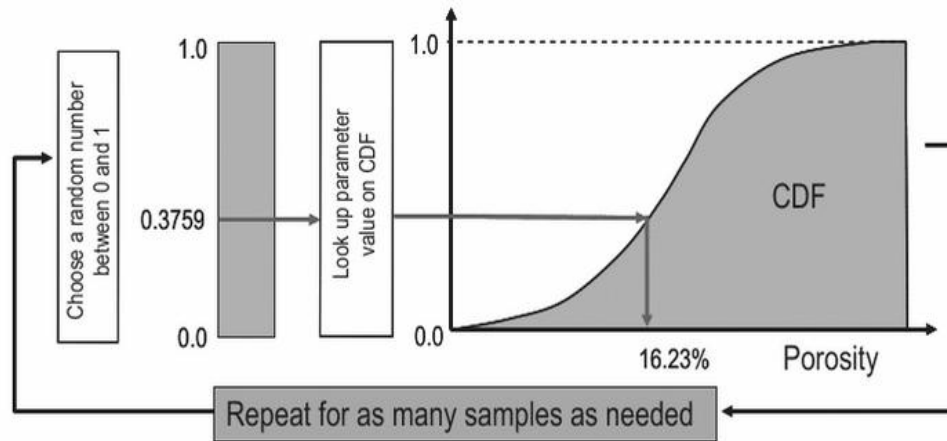
$$F(Z_n) = R \quad [4-31]$$

$$R = F^{-1}(R) \quad [4-32]$$

R = Rektangulær fordelingsfunksjon mellom 0 og 1

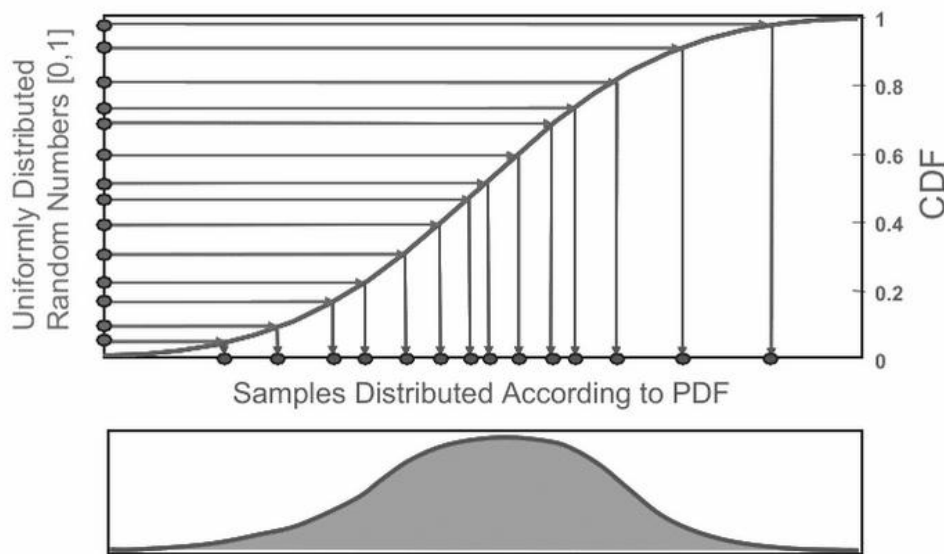
F = Kumulativ fordelingsfunksjon

Z_n = Inngangsvariabel



Figur 4-9: Iterasjonsprosedyre for Monte Carlo-simulering [23]

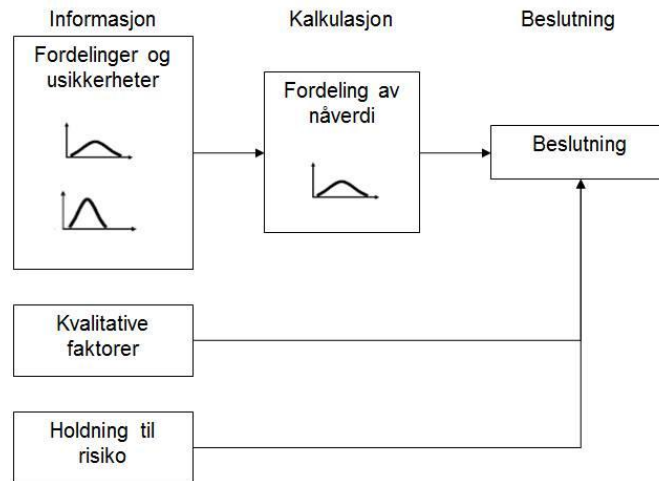
I første omgang blir sannsynlighetsfordeling (PDF) omgjort til dens tilsvarende kumulative fordelingsfunksjon (CDF). Det genereres deretter et tilfeldig tall, R , som har en uniform fordeling mellom 0 og 1. Dette oppnås ved å ta den inverse av samlingen (prøven). Det genereres flere treff der hvor CDF har høyest stigningstall – tilsvarende hvor PDF har høyest verdi. Se figur 4-10. [23]



Figur 4-10: Akkumulering av iterasjonsresultater [23]

4.3.3 Vurderinger

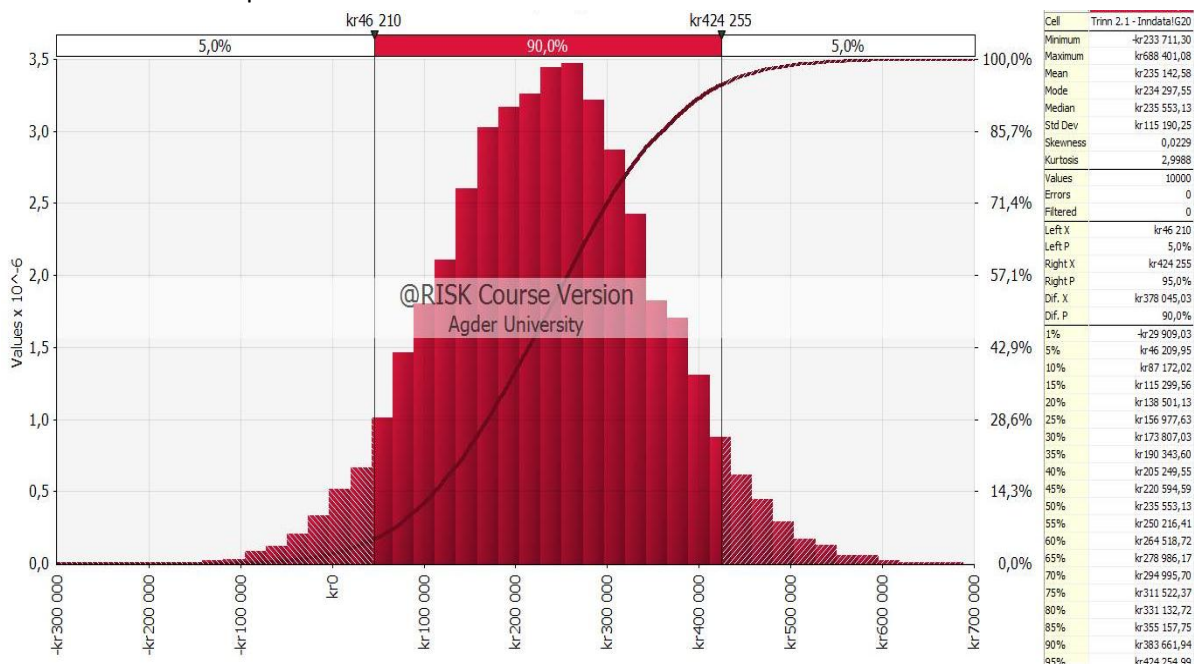
Til venstre i figur 4-11 finner vi inngangsvariablene, Z_1 og Z_2 , i senter er kalkulasjonen, $f(Z_1, Z_2)$, og til høyere er resultatvariabelen, $R(Z_1, Z_2)$. Etter at en har kalkulert resultatvariabelen for tusener av datasett må en foreta en vurderingsprosess av resultatfordelingen, og ta en beslutning om hvorvidt den aktuelle aktiviteten skal igangsettes. Beslutningen avhenger av resultatfordelingen, kvalitative faktorer slik som f.eks. sikkerhet, og til slutt hvilken holdning beslutningstakeren har til risiko. [24]



Figur 4-11: Illustrasjon av Monte Carlo-simulering. Nåverdiberegning med to inngangsvariabler [24]

Figur 4-12 viser resultatet av en Monte Carlo-simulering hvor stokastiske variable har blitt benyttet i en netto nåverdiberegning. Resultatet er en stokastisk netto nåverdi. Dette er resultatet av kalkulasjonen i senter av figur 4-11. Simuleringen viser ulike resultater, blant annet:

- 90 % sannsynlighet for at fornyelse vil gi et resultat på mellom kr 46 210 og kr 424 255.
- Minimumsverdi på kr – 233 711
- Maksimumsverdi på kr 688 401
- Middelvei på kr 255 142



Figur 4-12: Illustrasjon av en MCS av netto nåverdi

4.4 Definisjon av risiko

Risiko er definert som «kombinasjonen av sannsynligheten for og konsekvensen av en uønsket hendelse» [25]. For å anslå risiko forbundet med et objekt må vi derfor vite hvilke hendelser som kan inntreffe i forbindelse med objektet, sannsynligheten for at disse hendelsene inntreffer, og konsekvensen av dem. Risiko omhandler alltid fremtiden, og er et anslag på usikkerhet over hva som kan skje [5].

$$Risiko = \sum_{i=1}^n C_i * p_i \quad [4-33]$$

$$C_i = \text{Konsekvens av hendelse } i$$

$$p_i = \text{Sannsynligheten for at hendelse } i \text{ skal inntreffe}$$

Det er viktig å være oppmerksom på at det ikke finnes *sann* risiko. En risikovurdering er aldri helt objektiv og alle beregninger er basert på en modell av den virkelige verden. En persons erfaringer og personlighet kan også virke inn på forståelsen og vurderingen av risikoen knyttet til et analyseobjekt. For eksempel er det vanskelig å beregne de nøyaktige sannsynlighetene og konsekvensene forbundet med uønskede hendelser i et fallskjermhopp, og en erfaren fallskjermhopper vil kunne vurdere risikoen annerledes enn en uerfaren amatør.

Risiko kan tolkes som faren forbundet med en situasjon eller et objekt. Risikoinformasjonen kan benyttes som beslutningsgrunnlag for å bestemme om vi skal gjennomføre en aktivitet – for eksempel investere i en ny maskin, bygge en fabrikk, bygge ut et oljefelt – eller bestemme tiltak forbundet med en allerede pågående aktivitet – vedlikeholde en maskin, bygge midtdeler på en ulykkeutsatt veg, sette opp beredskapssystemer etc. Risikoinformasjonen kan uttrykkes i mange forskjellige størrelser, og på mange forskjellige måter. Størrelser som forventet antall ulykker, forventet avkastning, forventet investeringsbehov, og så videre. Informasjonen kan gis som gjennomsnittsstørrelser, eller i diagrammer som viser risikoens spredning [5].

Det er viktig å notere seg at ulike personer kan tolke risiko forskjellige. En hver person har sin egen holdning til risiko og hvor mye risiko som kan tolereres. En restriksjon mot risiko kalles **risikoaversjon** – en mer risikoavers person har høyere mentale barrierer for å gjennomføre en aktivitet med en spesifikk risiko enn en mindre risikoavers person. Det er derfor viktig med gode retningslinjer og risikoakseptkriterier for å sikre objektivitet i risikoevalueringen, der det er hensiktsmessig.

4.4.1 Risikoanalyse og -evaluering

En risikoanalyse handler om å avdekke kartlegge uønskede hendelser og kildene til disse, beregne eller bestemme sannsynligheten for disse hendelsene, og finne konsekvensene av at hendelsene inntreffer. Når denne informasjonen har blitt samlet inn danner man seg et risikobilde – en vurdering av fremtidig risiko forbundet med analyseobjektet. Det er altså tre grunnleggende spørsmål som må stilles for å samle denne informasjonen:

- Hva kan gå galt? Hvilke uønskede hendelser som kan utgjøre skade på verdier kan inntreffe?
- Hva er sannsynligheten for at hendelsene inntreffer? Kan oppgis som frekvens eller sannsynlighet. Man kan senke risikoen ved å redusere frekvens eller sannsynlighet for en hendelse.

- Hvilke konsekvenser kan hendelsene medføre? Hvilke skader vil hendelsene påføre verdiene? Man kan senke risikoen ved å innføre barrierer for konsekvensene.

Risikoanalyser benyttes – sammen med risikoevalueringen – for å skaffe et beslutningsgrunnlag, og kan brukes i flere sammenhenger [5]:

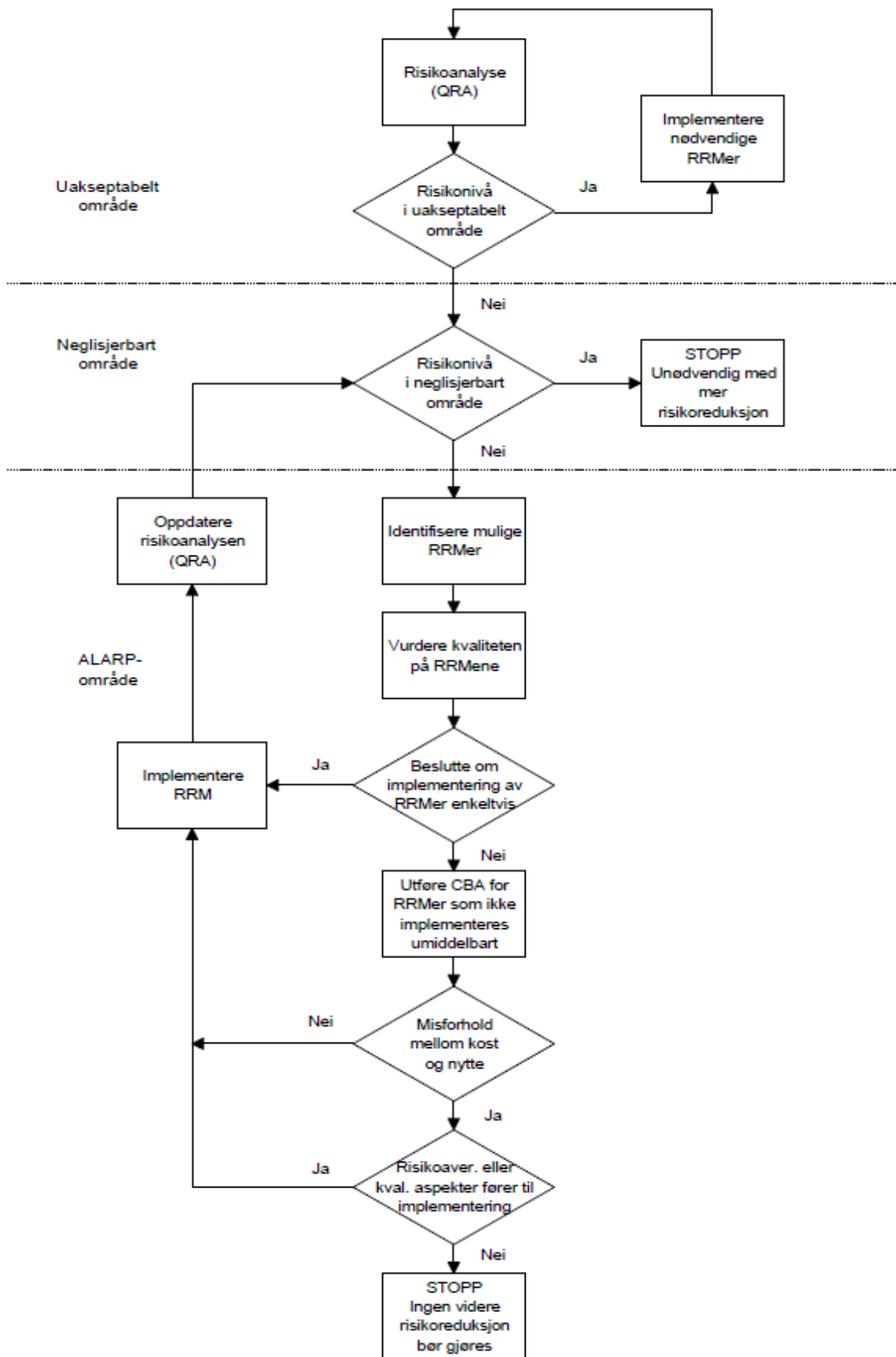
- Avdekking og håndtering av avvik
- Systematiske gjennomgang av risikoutsatte aktiviteter
- Vurdering av risikoreduserende tiltak
- Prioritering av tiltak i forbindelse med drift
- Oppfølging av tiltak
- Planlegging, prosjektering og valg av løsninger

Ved endt risikoanalyse foretas en risikoevaluering for å evaluere risiko i analyseobjektet opp mot risikoakseptkriterier, foreslå risikoreduserende tiltak og dokumentere resultatene [5]. I risikoevalueringsteget kan det blant annet ligge kost-nytte analyser for å treffe effektive risikoreduserende løsninger. Samlet omtales ofte risikoanalyse og -evaluering for **risikovurdering**. Figur 4-13 viser et flytskjema for risikostyring.

4.4.2 Risikoakseptkriterier

Risikoakseptkriterier er de kriterier som angir hvor høy risiko som kan aksepteres for en aktivitet. De kan være kvantitative eller kvalitative, og sammenlignes med resultatene fra risikoanalysen for å bestemme tiltak. Kriteriene må normalt tilpasses situasjonen; Aktivitetens viktighet, samfunnets verdier, nærhet til tredjepersoner, erfaringer, myndighetskrav, om aktiviteten er påtvunget eller frivillig etc. er ting som kan påvirke risikoakseptkriteriene [5].

Ofte klassifiseres risiko i en **risikomatrix** (kapittel 4.4.4) som bestemmes ut fra konsekvens og sannsynlighet for en hendelse. Risikoakseptkriteriene setter da grenser for sonene, fra akseptabel til uakseptabel risiko. Befinner man seg i sonen for uakseptabelt risikonivå – signifikant høyere enn risikoakseptkriteriet – må risikoen reduseres ved bruk av **risikoreduserende tiltak** (RRM) (kapittel 4.4.5). Befinner man seg i området rundt risikoakseptkriteriet – ikke signifikant høyere eller lavere – bør det gjennomføres analyser for å prioritere de mest effektive tiltakene. Hvis risikonivået er i neglisjerbart område – signifikant lavere enn risikoakseptkriteriet – er det unødvendig å gjennomføre risikoreduserende tiltak. Se for øvrig figur 4-13 og 4-14.



Figur 4-13: Prosess for vurdering av risikoreducerende tiltak [26]

4.4.3 Farekilder og trusler

Rausand og Utne [5] definerer en farekilde som «en egenskap, en tilstand eller et forhold som kan lede til en uønsket hendelse». Av dette følger det at vi i en risikosammenheng må være svært bevisste på potensielle farekilder, da disse er risikofaktorer. I kombinasjon med en utløsende faktor kan farekilden føre til en ulykke eller andre typer uønskede hendelser. Oppmerksomhet og indikatormåling i tilknytting til farekilder er derfor viktig for å kunne redusere risiko. Et eksempel på en farekilde kan være damp under høyt trykk i en prosessbedrift eller et kraftverk. En indikator her vil typisk være en trykkmåler. En annen farekilde, relevant for denne oppgaven, kan være en høyspentlinje over et boligområde eller en tursti.

En spesiell type farekilder stammer fra bevisste, ondsinnede handlinger. Disse farekildene kalles for trusler [5]. Mennesker er uberegnelige og irrasjonelle, og det er mer komplisert å analysere handlingsmønstre forårsaket av mennesker enn av livløse objekter og systemer. Som en konsekvens av denne uberegneligheten og kompleksiteten kan truslene raskt endre seg. For å gi en oversikt over trusler utarbeides ofte et *trusselbilde*, en oversikt over hvilke trusler en bedrift, institusjon eller et land står ovenfor [5]. PSTs årlige trusselvurdering er et eksempel på et trusselbilde [27].

4.4.4 Risikomatrise

Risikomatrise er et verktøy som kan anvendes for å synliggjøre omfanget av risikoen for en hendelse. Her plottes de uønskede hendelsene inn i matrisen. Risikomatrisen skiller mellom sannsynlighet og konsekvens for en hendelse. Dersom en hendelse kategoriseres som svært sannsynlig, men liten konsekvens, plasseres hendelsen nederst i høyre hjørnet av matrisen. [5]

Risikomatrisen er hjelpsom i situasjoner hvor en skal prioritere risikoreduserende tiltak, da matrisen gir en god og systematisk oversikt over hvilke hendelser som kan klassifiseres som alvorlige og hvilke som er mindre alvorlige.

Matrisen er vanligvis oppdelt i tre hovedområder; grønn, gult og rødt (figur 4-14). [5]

- Grønt-område: De hendelsene som klassifiseres innenfor dette område, tyder på en akseptabel risiko. Dersom det finnes kostnadseffektive tiltak som reduserer risikoen ytterligere, anbefales virksomheten å iverksette slike tiltak.
- Gult-område: Hendelsene som faller inn i dette området krever ytterligere vurdering og analyse. Det vil her være avgjørende med kostnadseffektive tiltak som kan bidra til å forskyve hendelsen over i grønn sone for å redusere sannsynligheten eller alvorlighetsgraden av uønskede hendelser.
- Rødt-område: De hendelsene som klassifiseres innenfor dette område er ikke akseptable og krever risikoreduserende tiltak.

Om man befinner seg i det gule området er det nødvendig å prioritere og analysere tiltak for å sikre at kun de effektive risikoreduserende tiltakene prioriteres og gjennomføres. Ofte benytter man **ALARP-prinsippet** (As Low As Reasonable Practical) som sier at risikoen skal reduseres til et nivå som er fornuftig og praktisk gjennomførbart. Man gjennomfører derfor ikke tiltak som har en uforholdsmessig høy kostnad eller inngripen i forhold til redusert risiko. Dette kan uttrykkes ved følgende formel: [5]

$$\frac{\text{Kostnad av tiltaket}}{\text{Forventet kostnadsreduksjon på grunn av tiltaket}} \leq DF \quad [4-34]$$

hvor DF er en disproporsjonalitetsfaktor som sier hvor disproporsjonale kostnadene kan være. En tiltaksvurdering basert på kostnader og fordeler kalles ofte en kost-nytte-analyse (kapittel 4.11.4).

Bruk av risikomatrisen som verktøy setter krav til at virksomheten må ha stor forståelse og forhold til hvilken risiko som er akseptabel og hvilken som ikke er akseptabel. Se akseptkriterier (kapittel 4.4.2).

Risikomatrisen har som alle andre risikoverktøy sine begrensinger. Dersom en velger å dele risikoen opp i mange bidrag, vil bidragene bli ubetydelige, selv om den totale risikoen for hendelsen ikke er ubetydelig. Beslutningen om risikoen er akseptabel eller ikke, bør av den grunn ikke tas uten overordnet vurdering og analyse.

En uønsket hendelse kan ha flere forskjellige konsekvenser. Når en skal designe eller velge konsekvensklassene kan en ta i bruk ulike tilnærminger. Valget av konsekvensklasse avgjør hvilken tilpasning frekvensklassene eller sannsynlighetsklassene. Eksempler på ulike tilnærminger kan være:

- Gjennomsnittkonsekvens
- Den mest sannsynlige konsekvensen
- Den verst tenkelige konsekvensen

En risikomatrix kan anvendes for hver konsekvenskategori hvis ønskelig (mennesker, miljø, produksjon ol.), men akseptkriteriene kan variere for de ulike konsekvenskategoriene. Det vil i flere tilfeller være slik at en virksomhet ønsker et større felt for rødt område i tilfeller hvor en forholder seg til personskader, kontra materielle skader. [5]

| Severity class | Annual probability | | | | | | | |
|----------------|--------------------|------------|----------|-------|-------|-------|------------|------|
| | Negligible | | Very Low | | Low | | Medium | High |
| | 1E-06 | 1E-05 | 1E-04 | 1E-03 | 1E-02 | 1E-01 | 1 | |
| Catastrophic | | | | | | NOT | ACCEPTABLE | |
| Severe | | | ALARP | | | | | |
| Moderate | | | | | RRM | | | |
| Limited | | ACCEPTABLE | | | | | | |

Figur 4-14: Et eksempel på risikomatrix, med markering av områder og virkning av RRM. [28]

4.4.5 Risikoreduserende tiltak

Risikoreduserende tiltak – Risk Reduction Measures (RRM) – er tiltak som er ment å redusere risikoen forbundet med et objekt, eller en hendelse. Disse tiltakene kan enten redusere konsekvensen av en hendelse, eller sannsynligheten for at hendelsen skal inntreffe [5]. Generelt kalles sannsynlighetsreduserende tiltak for preventive, da for eksempel et preventivt vedlikehold på en enhet vil redusere sannsynligheten for at enheten feiler. De konsekvensreduserende tiltakene er

kurative, da de reduserer konsekvensen ved en hendelse når den først har inntruffet. Dette kan for eksempel være å redusere reparasjonstider, eller innføre beredskapslager.

Tiltakene har en kostnad knyttet til seg, enten i form av lavere sikkerhetsmarginer, høyere investeringskostnader, ekstra inspeksjoner etc. Det gjøres derfor normalt en sammenligning mellom tiltakets effekt og kostnad, for å sikre høyest effekt relativt til hvor høy innsats tiltaket krever. Et eksempel på en slik sammenligning er en kost-nytte-analyse (kapittel 4.11.4). Kost-nytte-analysen er et kostnadsobjekt i seg selv, og grundigheten av en slik analyse avhenger derfor av hvor høy risikoen er i utgangspunktet, og hvor høy kostnad tiltaket er forbundet med.

Risikoreduserende tiltak kan redusere risiko på flere ulike måter. Rausand og Utne [5] benytter følgende liste for reduksjon og fjerning av farekilder (fritt redigert):

- Fjerne farekilde – bytte ut en farlig komponent eller et farlig stoff med noe mindre farlig.
- Redusere farekilde – redusere energien i et system, for eksempel trykk i en prosess.
- Skape avstand – legge inn en sikkerhetssone mellom mennesker og farekilde.
- Redusere eksponering – begrense tiden et menneske er i nærheten av en farekilde.
- Utvikle mer robuste systemer – dimensjonere systemene for høyere påkjenninger.

4.4.6 Risiko- og sikkerhetsindikatorer

Når en risikoanalyse gjennomføres er som oftest resultatet statistisk – det er gitt etter at man har fullført analysen, og krever en ny analyse for å oppdateres. I den virkelige verden endres risikonivåer konstant, og det kan derfor være nødvendig å utarbeide indikatorer som kan gi en rask oppdatering av risikonivået, uten en helt ny analyseprosess.

En indikator kan beskrives slik [29]: «*En indikator er en målbar variabel som benyttes for å beskrive tilstanden til et bredere fenomen eller aspekt av virkeligheten*». Risikoindikatoren skal derfor, via måling, gi en beskrivelse av risikoen forbundet med en komponent. I våres tilfelle kan dette for eksempel være målingene fra et resistografi av en stolpe. Resultatet fra målingene er inndata, og etablerte kriterier for hvor gode resultatene fra disse målingene skal være vil avgjøre risikonivået.

4.5 FMECA

Feilmode- og feileffektanalyse (FMEA – Failure Mode and Effects Analysis) var en av de første systematiske metodene for å analysere feil i tekniske systemer og ble utviklet for å avdekke problemer som kunne oppstå i militære systemer. En feilmode kan defineres som den fysiske eller funksjonsmessige effekten av feilen når en enhet feiler, og kan ses på som et bortfall av enhetens funksjon. FMEA-metoden har utviklet seg til den nå kjente FMECA-metoden (Failure Mode, Effects and Criticality Analysis, eller Feilmode-, Effekt- og Kritikalitetsanalyse) som inkluderer en beskrivelse eller en rangering av alvorligheten av feilen. [5]

4.5.1 Hensikt og anvendelsesområder

En FMECA er i hovedsak en kvalitativ analyse som normalt anvendes i designfasen av et teknisk system. Analysen kan i tillegg brukes i senere faser av et systems levetid. Hensikten med en FMECA er å identifisere deler eller egenskaper ved systemet som bør forbedres for å møte fastsatte krav til sikkerhet eller pålitelighet. En FMECA skal kunne gi svar på følgende spørsmål: [5]

- Hvilke feilmoder kan inntreffe for hver enkelt av komponentene i systemet?
- Hva er årsakene til disse feilmodiene?
- Hvilken effekt har hver enkelt feilmode på resten av systemet?
- Hvordan oppdages feilmodiene?
- Hvor ofte inntreffer hver feilmode?
- Hvor alvorlig er hver feilmode?
- Hva er risikoen tilknyttet hver feilmode?
- Hvilke risikoreducerende tiltak kan være aktuelle?

FMECA er i utgangspunktet en pålitelighetsanalytisk metode. Dette medfører at analysen også vil gi svar på feilmodier som er lite relevante for risikoen tilknyttet et system. Det vil være mulig å se bort i fra de feilmodiene som ikke innvirker på risikoen, dersom målsettingen med FMECA-analysen er å gi informasjon til en risikoanalyse.

FMECA-analyser utføres ofte på et forholdvis tidlig stadium i en risikoanalyse. Resultatene fra analysen skal gi grunnlag for mer omfattende systemanalyser slik som f.eks. feiltreanalyse og hendelsestreanalyse. En FMECA vil gi verdifull informasjon ved utarbeidelse av diagnostiseringsprosedyrer og sjekklister, ettersom feilårsakene og feilsymptomene kan spores tilbake fra en FMECA. [5]

4.5.2 Metodebeskrivelse

En FMECA er enkel å utføre da den ikke bygger på teknikk eller algoritmer. I tillegg setter den ikke store krav til analytisk evne, men den forutsetter inngående systemkunnskap, samt kunnskap om hvilke betingelser systemet kan operere under. For å sikre at analysen utføres på en systematisk og kontrollert måte følger man et spesielt skjema. Skjemaene kan variere, alt etter hvilken anvendelse det skal ha. Ofte utarbeides et spesialtilpasset FMECA-skjema for en bestemt anvendelse.

Før analysen starter må randbetingelsene for systemet fastlegges (hvilke deler av systemet og hvilke operasjonelle tilstander som skal betraktes). Deretter må en velge ut et egnet FMECA-skjema og fastlegge hvilke kolonner som skal tas med. Se tabell 4-2. [5]

4.5.3 Hierarkisk systemstruktur

Før utfylling av FMECA-skjema bør en beskrive systemet i en hierarkisk struktur, hvor en videre deler inn systemet i delsystemer. Hvert delsystem deles så inn i et antall enheter etc. Hvor mange nivåer som tas i bruk avhenger av systemets kompleksitet. Når den hierarkiske strukturen er satt opp og nummerert, kan komponentene så bli analysert. [5]

4.5.4 Utfylling av FMECA-skjemaet

Selve utfyllingen av FMECA-skjemaet illustreres best ved å gjennomgå et typisk skjema, rad for rad. Skjemaet er delt inn fem hoveddeler: Beskrivelse av enhet, Beskrivelse av feil, Effekt av feil, Risiko og Risikoreduserende tiltak. [5] og [30].

Tabell 4-2: FMECA-prosessen [5] og [30]

| Beskrivelse | Trinn | Veiledning |
|---------------------------------|---|---|
| Beskrivelse av enhet | <i>1. Referansenummer</i> | Her identifiseres komponenten ved en betegnelse eller et referansenummer, eller referanse til en tegning |
| | <i>2. Funksjon</i> | Komponentens funksjon eller arbeidsoppgave i systemet beskrives kort |
| | <i>3. Operasjonell mode</i> | De ulike operasjonelle tilstandene for delsystemet der komponenten som inngår beskrives kort. Skiller mellom normal drift og nedstengt |
| Beskrivelse av feil | <i>4. Feilmode</i> | For hver operasjonell tilstand identifiseres alle aktuelle feilmodi komponenten kan ha, sett utenfra. |
| | <i>5. Feilmekanisme og Feilårsak</i> | For hver av de feilmodiene som er identifisert i rad 4, listes her opp alle aktuelle feilårsaker/feilmekanismer. |
| | <i>6. Deteksjon av feil</i> | Her beskrives hvilke måter en kan oppdage de enkelte feilmodiene på. Dette trinnet skal angi konstruktørens anbefaling til for eksempel periodisk testing, tilstandsovervåking o.l. |
| Effekt av feil | <i>7. Effekt på delsystem</i> | I dette trinnet beskrives hvilken effekt feilmoden har på delsystemet som komponenten inngår i. |
| | <i>8. Effekt på systemets hovedfunksjon</i> | Her angis om, og i tilfelle hvordan, systemets hovedfunksjon påvirkes av feilmoden. |
| Risiko | <i>9. Feilfrekvens</i> | Her angis feilraten/feilfrekvens til komponenten med hensyn på den gitte feilmoden. |
| | <i>10. Risikovurdering</i> | Effekten av feilmodiene som ble identifisert i trinn 8 kan rangeres etter hvor kritisk hver enkelt er. |
| Risikoreduserende tiltak | <i>11. Kurative vedlikeholdstiltak</i> | Her velges hvilke kurative vedlikeholdstiltak som kan bidra til å fjerne eller redusere konsekvensen for komponenten. F.eks. Beredskapslager, reparasjon eller prosedyrer. |
| | <i>12. Preventive vedlikeholdstiltak</i> | Her velges hvilke preventive vedlikeholdstiltak som kan bidra til å fjerne eller redusere risikoen. <ul style="list-style-type: none"> – Redesign – Modifiserte operasjonsprosedyrer – Tidsbaserte inspeksjoner og vedlikehold |

4.5.5 Ressursbehov

En FMECA er en forholdsvis enkel analyse og utføres best av de som designer eller drifter systemet. En FMECA vil være ressurskrevende selv for enkle systemer, men det har i ettertid blitt utviklet datasystemer som forenkler dette. Som grunnlag for analysen må man ha inngående kjennskap til systemets oppbygging og virkemåte, samt til de miljø- og driftsforholdene systemet skal operere under. [5]

4.5.6 Fordeler og begrensinger

En FMECA-analyse kan være svært effektiv når den brukes på systemer som mest sannsynlig vil svikte på grunn av feil i en enkelt enhet. Dette kommer av at metoden undersøker hver feilmode separat, som uavhengige hendelser uten sammenheng med eventuelle andre feil i systemet. I tillegg vil analyseprosessen har stor nytteverdi, da man tvinges til å tenke igjennom og dokumentere alle feilmuligheter forbundet med konstruksjonen.

Begrensningene vil være at analysen fokuserer på uavhengige hendelser uten sammenheng med andre feil i systemet. Dette fører til at en FMECA ikke er perfekt for systemer som har en betydelig grad av redundans. For slike systemer er en feiltreanalyse mer hensiktsmessig. [5]

4.6 HAZOP

HAZOP-metoden ble utviklet av ICI (Imperial Chemical Industries) i England i 1963 for å avdekke mulige avvik i et kjemisk prosessanlegg, som ved avvik kunne føre til skade på mennesker og miljø eller driftsproblemer. Metoden har i senere tid blitt utviklet og brukes i dag ofte i forbindelse med prosjektering av prosessanlegg, enten som en selvstendig studie eller som et supplement for mer detaljerte risikoanalyser. [5]

HAZOP er en systematisk og kritisk granskningsmetode for de enkelte komponentene i et prosessanlegg og analysen baserer seg i hovedsak på anleggets prosess- og instrumenttegninger. Prosessen gjennomføres seksjon for seksjon, hvor en tar i bruk forhåndsbestemte ledeord eller stikkordsord på hver prosess-seksjon for å avdekke mulige avvik. [5]

4.6.1 Hensikt og anvendelsesområder

Hensikten ved bruk av en HAZOP-analyse er å avdekke alle mulige avvik fra normal operasjon som kan føre til skade på mennesker, miljø eller driftsproblemer. Dette kan omfatte alt fra avvik som oppstår i driftsfasen, oppstart, normaldrift, vedlikehold eller nedkjøring. HAZOP-analysen skal kunne gi svar på følgende spørsmål [5]:

- Hvilke avvik kan inntreffe og føre til skade på mennesker, miljø eller andre verdier?
- Hvilke avvik kan inntreffe og føre til operasjonelle problemer (driftsstans, ytelse osv.)
- Hva er årsakene til hvert av disse avvikene?
- Hva er effekten eller konsekvensen av hvert av avvikene?
- Hvilke barrierer eller sikkerhetstiltak er innført for å unngå eller redusere skadene tilknyttet hvert avvik?
- Hva kan videre gjøres for å redusere konsekvensene av hvert avvik?
- Hvem er ansvarlig for å følge opp eventuelle tiltak?
- Hvor stor er risikoen, målt som sannsynlighet og konsekvens, tilknyttet hvert avvik?

HAZOP grenser til HMS-risiko og Sikker Jobb Analyse (SJA). Det er dermed et hensiktsmessig verktøy når det kommer til å avdekke og kontrollere risiko ved spesifikke arbeidsoperasjoner. Oppgaven fokuserer imidlertid på analyse av tekniske enheter, og vi går derfor ikke grundig inn på HAZOP. Mer informasjon finnes i vedlegg E.

4.6.2 Fordeler og begrensinger

En vellykket HAZOP-analyse avhenger blant annet av fullstendige og nøyaktige tegninger og data, gruppens tekniske dyktighet og innsikt, samt evnen til å konsentrere seg rundt de avvikene av betydning som blir identifisert.

Fordelene med bruk av HAZOP-analyser er en systematisk og gjennomprøvd analysemetode som er egnet ved prosjektering av både små og store prosessanlegg. I tillegg kan metoden brukes som en sikkerhetsgjennomgang av kompliserte arbeidsprosedyrer. HAZOP kan også avdekke mulige sikkerhets- og driftsproblemer ved modifikasjoner av anlegg eller operasjonsprosedyrer.

Begrensingene med HAZOP er at en ikke-forutsatt fare ikke vil bli tatt med i analysen, og den tar liten hensyn til felles årsakfeil og menneskelige feilhandlinger. I tillegg er metoden avhengig av sammensetningen av gruppe-medlemmene. [5]

4.7 Preventivt vedlikehold

Preventivt vedlikehold er tiltak som gjennomføres før en enhet feiler, og har som hensikt å forlenge levetid og pålitelighet. Preventivt vedlikehold er motsatsen til kurativt vedlikehold, som forekommer etter at enheten har feilet (kapittel 4.8).

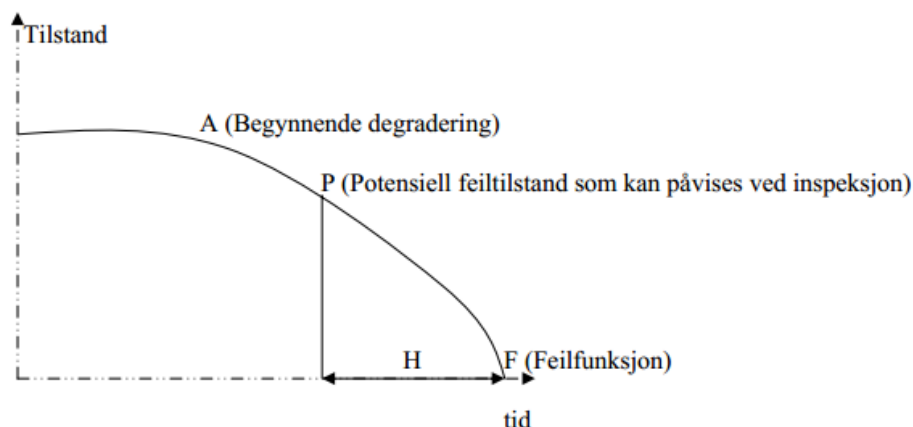
4.7.1 Endring i sviktintensitet uten bruk av vedlikeholdstiltak

Beskrivelse av effektivitet kan best fremstilles ved å sammenligne hvordan sviktintensiteten $\lambda(t)$ og påliteligheten $R(t)$ endrer seg med hensyn på tid, med og uten bruk av vedlikehold. Det vil her bli beskrevet seks prinsipielle forløp som vil danne et godt bilde av hvordan effekten av vedlikehold påvirkes. Man antar at sviktintensitetsfunksjonen $\lambda(t)$ starter på $t=0$ etter vedlikehold, kjent som «nullstilling». Se figur 4-16.

Tilfelle A beskriver den kjente «badekarkurven» med «barnesykdommer» i startfasen, tilfeldige feil i brukbar driftsfase, og slitasje mot slutten. Denne er mye brukt som totalbeskrivelse av en enhets sviktintensitet i løpet av teknisk levetid. Vi kan se at kurve A er en sammenstilling av kurve F, E og B. Det vil her være effektivt med «innkjøring» i startfasen, beredskap i driftsfasen og utskiftning i slutfasen (etter T_L). [30]

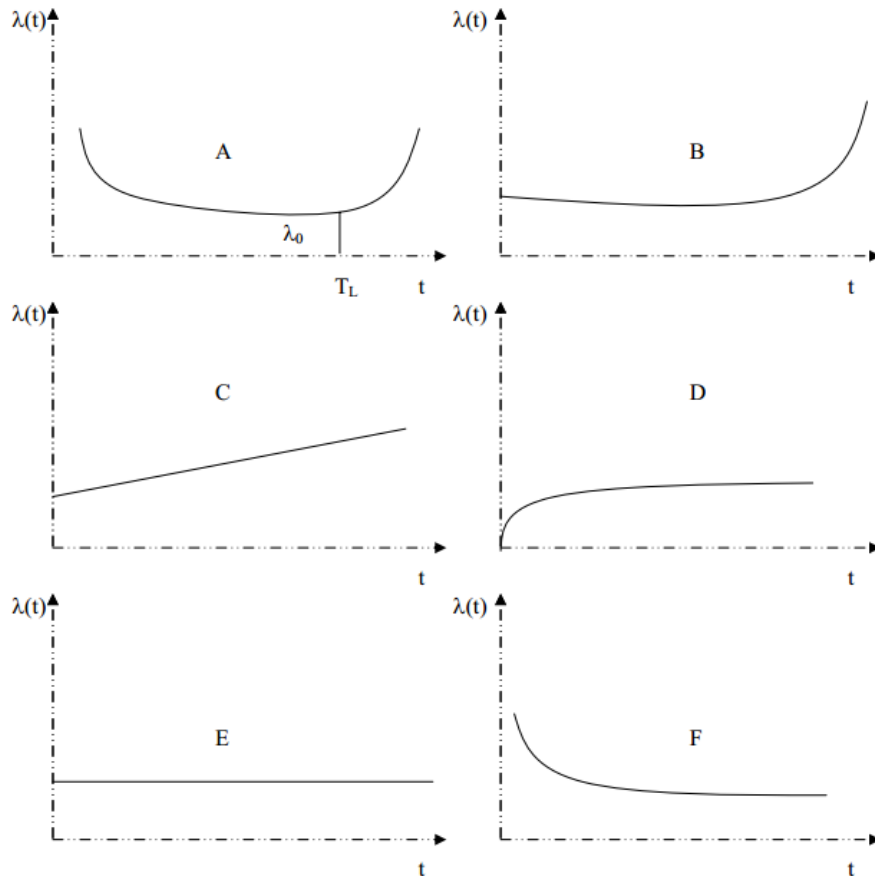
For tilfelle B vil en gjøre det samme som i A, men her er innkjøring unødvendig da sviktintensiteten er lav i startfasen. Dersom påliteligheten $R(t)$ ved T_L er høy, (lav λ_0) vil T_L definere «Safe Life» grensen. [30]

For tilfelle C vil inspeksjon være det mest effektive tiltaket. Av kurven ser en at det ikke er noen klar grense for hvor komponenten eller enheten er utslitt. Inspeksjon forutsetter at det finnes en potensiell feiltilstand som er mulig å detektere. Dette kan illustreres ved bruk av en P-F kurve (figur 4-15), hvor en vil måtte velge et inspeksjonsintervall mindre enn H. [30]



Figur 4-15: Illustrasjon av pf- kurve [30]

For forløpene illustrert i kurve D, E og F (se Figur 4-16) vil ikke preventivt vedlikehold være et effektivt tiltak. Det må her nevnes at ved preventivt vedlikehold i forløp D vil kunne oppnå en reduisering av sviktintensiteten $\lambda(t)$, men effekten vil være kort. Det er utført mye bortkastet vedlikehold på komponenter eller enheter som har slike forløp av sviktintensitet. Dette kommer av at forløpene ikke har vært kjent.

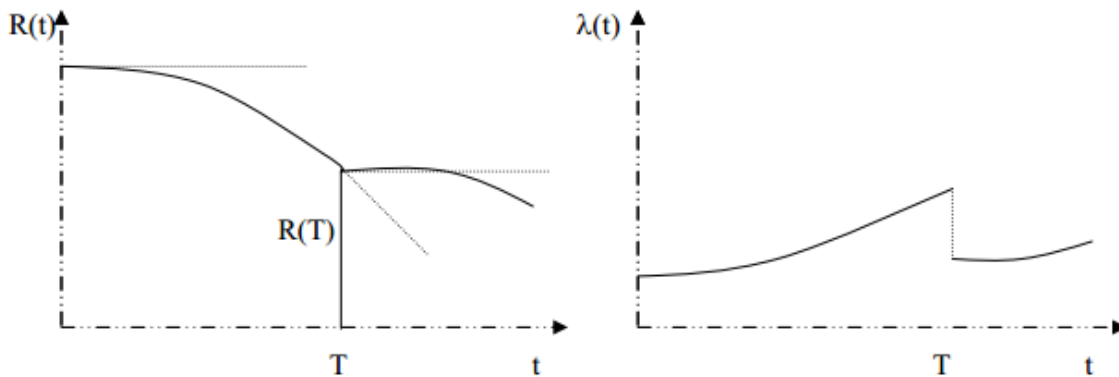


Figur 4-16: Fremstilling av ulike sviktintensitets-forløp [30]

Det er viktig å være klar over at kurveforløpene vist i figur 4-16 gjelder for en gitt enhet og en gitt feilfunksjon. F.eks. kan en og samme enhet bli utsatt for slitasje (A, B og C), mens skader forårsaket av tilfeldige feil vil følge kurveforløp E. [30]

4.7.2 Endring i sviktintensitet ved bruk av vedlikeholdstiltak

Dersom vi antar at det utføres overhaling eller utskiftning ved et utskiftningsintervall T kan en undersøke hvilken virkning vedlikehold vil ha på komponenten i fremtiden, om man foretar analysen ved t=0. I dette tilfellet antas det økende sviktintensitet (IFR). Se Figur 4-17.



Figur 4-17: Virkning av vedlikehold for en gitt komponent [30]

Av figur 4- 17 ser en at påliteligheten $R(t)$ og sviktintensiteten $\lambda(t)$ endres som følge av utskiftning ved tiden T , og at sviktintensiteten får et fall og «nullstilles» ved tiden T .

Årsaken til at sviktintensiteten faller ved tiden T er at dette er en betinget sannsynlighet. Det vil si at det er gitt at komponenten har fungert opp til tiden T . Dette er ikke tilfellet med påliteligheten $R(t)$, hvor en står ved tiden $t=0$ og prøver å forutsi den mest sannsynlige innvirkningen av fremtidig vedlikehold, men hvor en ikke vet om vedlikehold har fungert i første intervall opp til tiden T . Vedlikeholdstiltaket ved tiden T vil ikke innvirke på feilsannsynligheten i første periode. [30]

4.7.3 Optimalt utskiftningsintervall

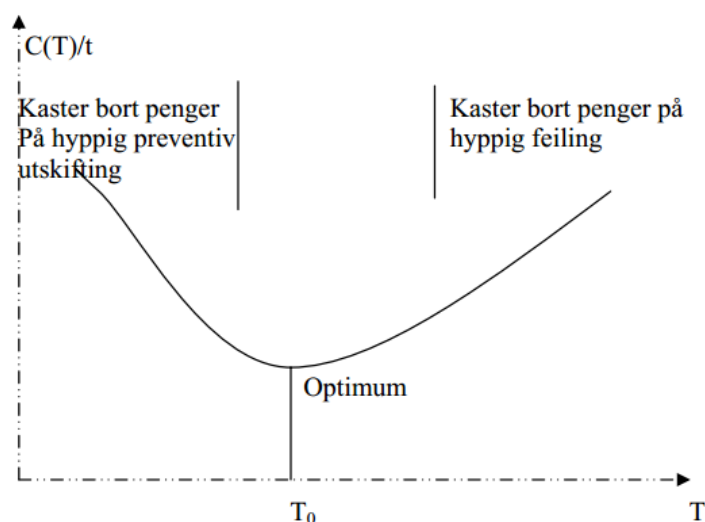
Ubetinget utskiftning er et vedlikeholdstiltak som man i flere tilfeller prøver å unngå da det i hovedsak ikke viser seg å være økonomisk effektivt. I situasjoner hvor det ikke finnes noen potensiell feiltilstand, kan det være at ubetinget utskiftning er eneste alternativ. Strategien blir her utskiftning etter at komponenten har gått T driftstimer, og hvor en ønsker å velge T kostnadseffektivt [30].

Parametere som vil påvirke valget, antatt Weibull-fordeling, er formparameteren, m , og skaleringsparameteren, θ . Forventet kostnad over et tidsintervall T kan utarbeides matematisk ved følgende formel:

$$C(T) = N_f * C_f * N_p * C_p \quad [4-35]$$

| | | |
|-------|---|--|
| C_p | = | Kostnad ved preventiv utskiftning |
| C_f | = | Kostnad utskiftning ved feil |
| N_p | = | Forventede antall preventive utskiftninger |
| N_f | = | Forventede antall utskiftninger ved feil |

Ved å introdusere funksjonen $C(T)$, som viser utskiftningsintervallet T over en lengre tid, vil en til slutt ende opp med en funksjon for forventet kostnad per tidsenhet som funksjon av vedlikeholdsintervall.



Figur 4-18: Illustrasjon av optimalt utskiftningsintervall i forhold til forventet kostnad [30]

Av figur 4-18 ser at det optimale utskiftningsintervallet befinner seg mellom to situasjoner, hvor man på den ene siden kaster bort penger på hyppige preventive utskiftninger og på den andre siden kaster bort penger på hyppig feiling. Det optimale utskiftningsintervallet vil befinne seg i nullpunktet

av forventet kostnadsfunksjon $C(T)$. Dette finner en ved å derivere funksjonen. Ved antatt Weibull-funksjon kan optimal utskiftningsintervall gis ved følgende formel:

$$T_0 = \theta \left(\frac{C_p}{(m-1)C_f} \right)^{\frac{1}{m}} \quad [4-36]$$

T_0 = *Optimalt utskiftningsintervall*

Av formelen ser en at optimal utskiftningsintervall eksisterer innenfor område $m > 1,0$. Dette er i overenstemmelse med påstanden innledningsvis om at vedlikehold er bortkastet for $m < 1,0$. I tillegg ser en at dersom forholdet mellom C_p og C_f er lav, vil også det optimale utskiftningsintervallet være lavt. Dette kan også tolkes som dersom feilingskostnadene er høye, så vil det være optimalt med et kort utskiftningsintervall. [30]

4.8 Kurativt vedlikehold

Kurativt vedlikehold er vedlikehold som skjer etterfølgende en hendelse for å rette opp – kurere – en allerede inntruffet feil. Denne typen vedlikehold påvirker tilgjengeligheten, og ikke påliteligheten som ved preventivt vedlikehold. Tilgjengeligheten til en enhet er definert som den andelen av tiden enheten er operativ [30].

For å sikre tilgjengeligheten til en enhet er det nødvendig at vedlikeholdsvennligheten til enheten er høy – den må være enkel å vedlikeholde, og tiden som går med til vedlikeholdet må være så kort som mulig. Vedlikeholdstiden er avhengig av tiden som går med til feildiagnostisering, tilgjengelighet av reservedeler og tiden som går med til feilretting.

4.8.1 Beredskap og reservedeler

Beredskap omfatter de tekniske, operasjonelle og organisatoriske tiltakene som må planlegges iverksatt ved inntrådte farer eller ulykkessituasjoner. Tiltakene planlegges iverksatt for å beskytte mennesker, miljø og økonomiske verdier [26].

Beredskapslagerstyring tar utgangspunkt at store lagerbeholdninger binder opp store kapitalutgifter, samtidig som en liten lagerbeholdning kan medføre operative problemer og inntektskrav. Det har derfor blitt lagt større vekt på lagerstyring i form av beredskapsstyring for å legge til grunn optimalt lagerhold. Høy standardiseringsgrad, leverandøransvar, felles lagerhold og effektivt lagersystem er prinsipper som ofte blir lagt til grunn for optimalt lagerhold [30]. Andre tekniske definisjoner som er med på å øke forståelsen omkring beredskapsstyring er [26]:

- Beredskapsanalyse: Omfatter etablering av fare- og ulykkessituasjoner slik som dimensjonerende ulykkessituasjoner, etablering av funksjonskrav til beredskap og identifikasjon av dimensjonerende tiltak.
- Beredskapsetablering: Omfatter en systematisk prosess som tar for seg planlegging og implementering av tiltak for den aktuelle virksomheten på bakgrunn av allerede gjennomførte risiko- og beredskapsanalyser.

I senere tid har lagerholdfilosofien «Just In Time», eller JIT, blitt lagt til grunn for optimal lagerstyring, hvor leverandøren får hovedansvaret for lagerhold og operatørene får levert reservedeler når behovet melder seg. Det er normalt å dele type reservedeler inn i forbruksmaterieell, forbruksreservedeler, aktive reservedel og beredskapsreservedeler. [30]

4.8.2 Lagerhold basert på et sannsynlighetskriterium

En forenklet metode for å løse problemet med antall reservedeler er å kreve en viss sannsynlighet for at en ikke skal gå tom for reservedeler i beredskapslageret. Antar at tiden til svikt for komponenten er eksponentialfordelt, med en sviktintensitet λ . [30]

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad [4-37]$$

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad [4-38]$$

Videre antar man at det foretas flere reparasjoner på komponenten. Dette kan modelleres som en Poisson-fordeling:

$$P(\mathbf{n} = n) = \frac{(\lambda t)^n}{n!} e^{-\lambda t} \quad [4-39]$$

Fordelen med formel 4-40 er at man kan beregne sannsynligheten for antall svikt i en tidsperiode, t , fremfor å forholde seg til en gjennomsnittsverdi. Tiden til reparasjon eller tiden som går til å få levert en ny komponent, t_r , vil her være den kritiske tidsperioden. I løpet t_r er en avhengig av å ikke få flere svikt enn antall komponenter som finnes i beredskapslageret, N_s . Dersom det kreves en beskyttelses-sannsynlighet P_L mot å gå tom for komponenter kan antall nødvendige lagerenheter beregnes som en Poisson-rekke: [30]

$$P(\mathbf{n} \leq N_s) = \sum_{n=0}^{n=N_s} \frac{(\lambda t)^n}{n!} e^{-\lambda t} \geq P_L \quad [4-40]$$

$$t_r = \frac{MTTR}{365} * HRS \quad [4-41]$$

$$\lambda_T = \lambda * NCPU * NOU \quad [4-42]$$

| | | |
|----------------------|---|--|
| <i>MTTF</i> | = | <i>Middeltid til feiling (Mean Time To Failure) (driftstimer)</i> |
| <i>MTTR</i> | = | <i>Middeltid til reparasjon (Mean Time To Repair) (arbeidsdager)</i> |
| <i>NOU</i> | = | <i>Antall enheter (Number Of Units)</i> |
| <i>NCPU</i> | = | <i>Antall komponenter per enhet (Number of Components Per Unit)</i> |
| <i>HRS</i> | = | <i>Driftstid per komponent per år</i> |
| <i>N_s</i> | = | <i>Antall komponenter på lager</i> |
| <i>P_L</i> | = | <i>Kalkulert akseptert sannsynlighet for ikke å gå tom for komponenter</i> |
| <i>λ_T</i> | = | <i>Total sviktintensitet for alle komponentene</i> |

I situasjoner hvor det er begrenset antall komponenter på lager (N_s), og en har oppgitt en kalkulert akseptert sannsynlighet for ikke å gå tom for komponenter på lager, P_L , er mulighetene enten å:

- Redusere MTTR – Effektivisere reparasjon
- Øke MTTF – Forbedre design eller vedlikeholdsprogram

4.9 Pålitelighetsbasert vedlikehold (RCM)

RCM (Reliability Centered Maintenance, eller pålitelighetsbasert vedlikehold) er et systematisk analyseverktøy som ved bruk av logiske beslutningsdiagrammer skal fastsette nødvendige preventive vedlikeholdstiltak og tilhørende tidsintervall. [30]

4.9.1 Hensikt og anvendelsesområder

Hensikten med en RCM-analyse er å redusere vedlikeholdskostnadene og øke påliteligheten. Dette oppnås ved at metoden sikrer seg inn på de viktigste funksjonene i et system, i tillegg til å fjerne eller redusere unødvendige vedlikeholdstiltak for behandling av det gitte systemet. Som bruker er det viktig å forstå at metoden ikke skal fungere som erstatning for dårlig design, utilstrekkelig byggekvalitet eller dårlige vedlikeholdspraksis. [31]

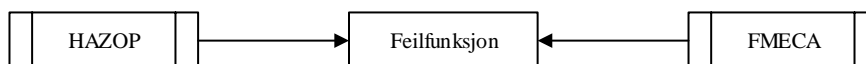
RCM ble oppfunnet for bruk innen atomkraftverk i Amerika og senere Frankrike. I tillegg til å være dominerende innen oljeindustrien, er RCM tatt i bruk i andre industrier som for eksempel NASA, og flyindustrien i forbindelse med utvikling av nye fly. [31]

4.9.2 Metodebeskrivelse

RCM kan sammenlignes med en utvidet FMECA-analyse, hvor fokuset her er rettet mot kritisk gjennomgang av mulige preventive vedlikeholdstiltak. Metoden anvendes i design-stadiet for et system, hvor en gjennomgår tre hovedtrinn: [30]

- Nivå 0 Utfører en kortfattet HAZOP & FMECA-analyse for enheten.
- Nivå 1 Analyse av endelige konsekvenser basert på ulike feilfunksjoner og årsaker med henhold på sikkerhet, operasjonsdyktighet og økonomi.
- Nivå 2 Valg av preventive vedlikeholdstiltak og tilhørende tidsintervall som kan forhindre eller redusere mulige feilfunksjoner og tilhørende konsekvenser.

Hovedoppgaven i nivå 0 (figur 4-19) er å bruke analyseverktøyene FMECA og/eller HAZOP til å registrere og undersøke de ulike feilfunksjonene. Gjennomføringen av en FMECA-analyse er gjennomgått i kapittel 4-5. [30]

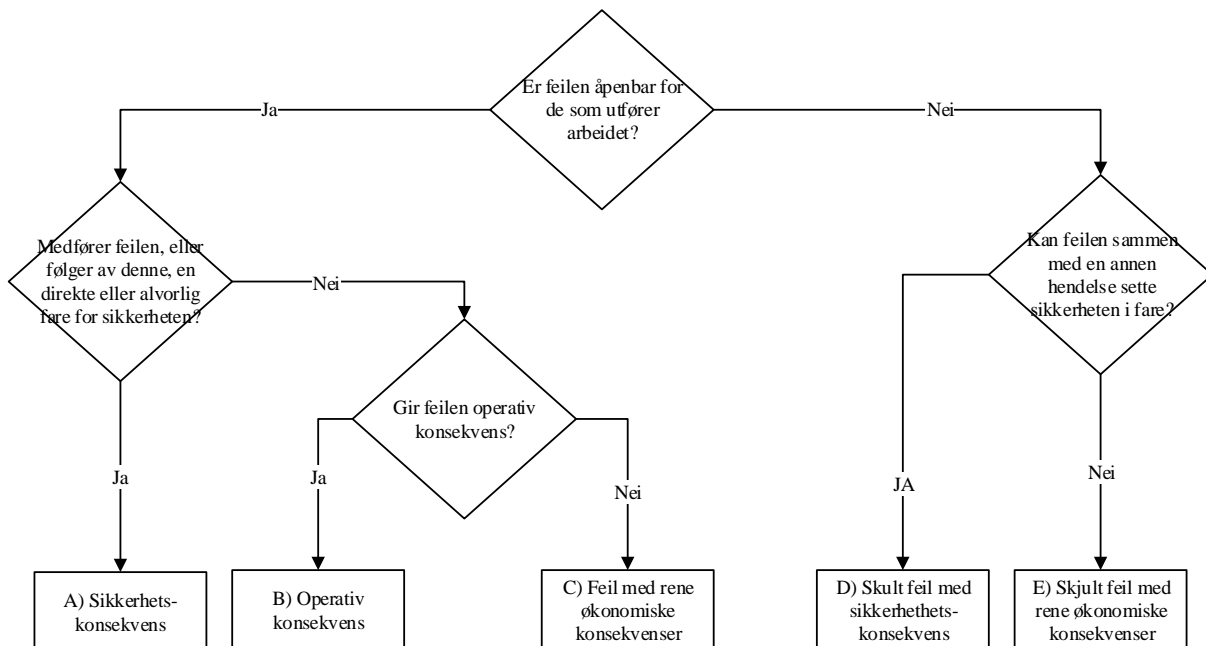


Figur 4-19: Trinn 0 – RCM [30]

Videre i nivå 1 gjennomfører RCM-gruppen en konsekvensanalyse (figur 4-20). De ulike spørsmålene skal besvares med enkle ja- og nei-svar. Utgangene A, B, C, D og E svarer til ulike konsekvenser som feilfunksjonen vil medføre på systemet. Det er viktig at hver feilfunksjon analyseres for at vedlikeholdsplanen skal kunne skreddersys.

- | | |
|-------------------------------|--------------------------------------|
| A. <i>Safety Effects</i> | Konsekvenser tilknyttet sikkerheten. |
| B. <i>Operational Effects</i> | Konsekvenser tilknyttet operasjonen. |

- C. *Non-Operational Effects* Ikke- operasjonelle konsekvenser.
 D. *Hidden Safety Effects* Skjulte effekter tilknyttet sikkerheten.
 E. *Hidden Non-Safety Effects* Skjulte effekter ikke relatert til sikkerhet.



Figur 4-20: Trinn 1 – RCM [30]

Spørsmål nummer 1: *Er feilen åpenbar for besetningen/operatører når de utfører sine vanlige arbeidsoppgaver?* Hovedoppgaven er å skille mellom skjulte eller åpenbare feilfunksjoner.

- *Ja* Gå til spørsmål 2
- *Nei* Gå til spørsmål 4

Spørsmål nummer 2: *Medfører feilen, eller følger av denne, en direkte og alvorlig fare for sikkerheten?* Hovedoppgaven er her å avgjøre alvorlighetsgraden til feilfunksjonen.

- *Ja* Sikkerhetseffekter
- *Nei* Gå til spørsmål 3

Spørsmål nummer 3: *Gir feilen operativ konsekvens?* Dersom feilfunksjonen ikke er en direkte og alvorlig fare for sikkerheten, må man undersøke om feilfunksjonen vil gi noen operativ konsekvens.

- *Ja* Operasjonelle effekter
- *Nei* Ikke-operasjonelle effekter

Spørsmål nummer 4: *Kan feilen sammen med en annen hendelse sette sikkerheten i fare?* Dersom feilfunksjonen viser seg å være skjult for besetningen eller operatørene, må en undersøke om feilfunksjonen, i samhandling med andre hendelser, kan sette sikkerheten i fare.

- *Ja* Skjulte sikkerhetseffekter
- *Nei* Skjulte ikke-sikkerhetseffekter

Når en har funnet feilingskonsekvensen må en i nivå 2 gjennomføre en systematisk og kritisk gjennomgang av mulige preventive vedlikeholdstiltak for enheten. Som i nivå 1 tar en i bruk enkle og systematiske spørsmål, slik som fremvist i figur 4-20. Som i trinn 1 er det viktig at hver enkelte feilfunksjon (feilmekanisme) gjennomgås. Dette er fordi de ulike feilmekanismene vil ha ulik konsekvens og vil kreve ulike tiltak. Eksempler på feilmekanismer for høyspent luftnett ble gjennomgått i kapittel 4.1.5.

Resultatene av de ulike vedlikeholds-tiltakene avhenger av resultatet fra nivå 1. Dersom nivå 1 resulterte i utgang A må alle vedlikeholds-tiltakene vurderes. De ulike preventive vedlikeholds-tiltakene vises i tabell 4-3. [30]

Tabell 4-3: Preventive vedlikeholdstiltak [30]

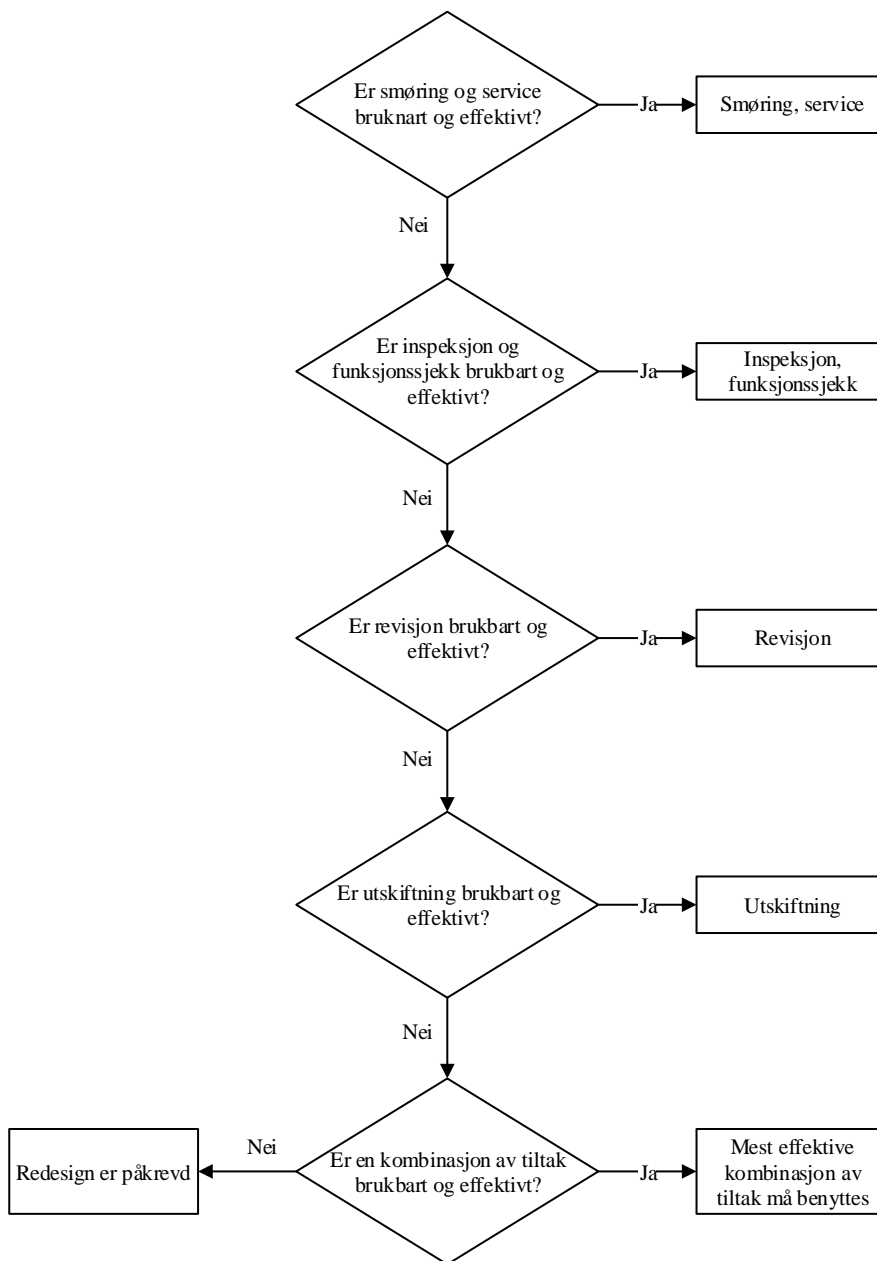
| Preventivt vedlikeholdstiltak | Beskrivelse |
|--|---|
| Smøring eller service | Fornyelse av smøremiddel eller påfylling av forbruksvarer |
| Inspeksjon | Eksaminasjon av enhetens tekniske tilstand og sammenlikning mot en gitt standard. Dette kan skje ved manuell inspeksjon eller ved bruk av måleutstyr. |
| Funksjonssjekk | Måling av enhetens funksjon og driftsparametere, samt sammenlikning med gitte toleranser for disse |
| Revisjon | Dette kan omfatte alt fra vask til fullstendig demontering og overhaling (Nullstillingsmål) |
| Utskiftning | Enhetens skiftes ut i sin helhet, uansett tilstand, uten inspeksjon og vurdering. |
| Operasjonssjekk | Test om enheten fungerer, men uten måling av parametere. Brukes kun ved skjult sikkerhetskonsekvens! |
| * Inspeksjon og funksjonssjekk er kun aktuelle dersom det eksisterer en potensiell feilmekanisme som kan oppdages i tide. Det må også være mulig å etablere kriterier for aksept relatert til degradering. | |

Figur 4-21 illustrerer en preventiv vedlikeholdstiltaksmeny for sikkerhetskonsekvens av feilfunksjon. Her skal alle tiltakene undersøkes. Om ingen tiltak er effektive er det nødvendig med redesign. Tiltaksmenyen må tilpasses den enkelte konsekvensutgangen. For eksempel får skjult sikkerhetskonsekvens (D) et ekstra tiltaksalternativ for operasjonssjekk. [30]

En RCM-analyse stiller spørsmål om tiltak er brukbare og effektive. Brukbart og effektiv kan defineres som at det skal være teknisk mulig å gjennomføre, samt at det øker påliteligheten. I tillegg må tiltaket være kostnadseffektiv. Kostnadseffektivt kan defineres som at kostnadene knyttet til vedlikeholdstiltaket ikke må overstige forventet reduksjon i kostnader grunnet mindre hyppig feiling. Dersom utfallet av RCM-analysen skulle vise seg å være sikkerhetskonsekvens vil konsekvensene som oftest være svært høye, og tiltakene kan tilsvarende ha høyere kostnader. [30]

4.9.3 Fordeler og begrensinger

En av de store fordelene med RCM er at metoden utvikler et vellstrukturert vedlikeholdsprogram. I tillegg reduseres vedlikeholdskostnader ved at en eliminerer bort unødvendige og lite effektive vedlikeholdstiltak. RCM reduserer samtidig sannsynligheten for feilmekanismer på utstyr og øker komponentens pålitelighet. Det finnes også begrensinger i metoden, blant annet er det en tidskrevende prosess og den krever mye ressurser i oppstartsfasen, f.eks. opplæring og tilgang til utstyr og måleinstrumenter. I tillegg må resultatene implementeres og forankres i virksomheten, noe som kan ses på som den største utfordringen med metoden [30].



Figur 4-21: Trinn 2 - RCM gitt sikkerhetskonsekvens A [30]

4.10 Innsamling og behandling av pålitelighetsdata

For å kunne anslå virkningen av vedlikeholdstiltak, og utvikle gode levetidsmodeller, er det nødvendig med omfattende pålitelighetsdata. Dette for å kunne danne et statistisk grunnlag for bruk av RAMS-teknologi og -metoder (Reliability, availability, maintainability and safety). I dette kapitlet vil vi presentere metoder for å samle og behandle pålitelighetsdata. Teorien er for det meste hentet fra oljesektoren, som ligger langt fremme på dette feltet.

4.10.1 OREDA

Oljedirektoratet startet i 1981, i samarbeid med en rekke oljeselskaper på norsk sokkel, et prosjekt hvis hensikt var å samle pålitelighetsdata om komponenter i den norske offshore-sektoren. Prosjektet fikk navnet «The Offshore Reliability Data Project», OREDA. Prosjektet er i dag under ledelse av SINTEF, og omfatter primært pålitelighetsdata for «Topside» og «Subsea» [32].

Målet med prosjektet var, og er, å tilby oppdaterte pålitelighetsdata for komponenter som benyttes i oljeleting og -produksjon. Ved å ha gode databaser for vedlikehold og pålitelighet ønsker man å oppnå bedre sikkerhet og høyere grad av kostnadseffektivitet, ved at vedlikeholdstiltak og sikkerhetsprosedyrer kan styres bedre og mer effektivt [32].

OREDA-databasene inneholder informasjon om ulike feilmekanismer, tilknyttede feilfrekvenser, og reparasjonstider. Data er samlet over tid, fra ulike selskap, og for en rekke ulike komponenter. Databasen gir således et statistisk grunnlag for beslutningstaking i tilknytting til vedlikehold. OREDAs metoder er av høy kvalitet, og har vært grundig utprøvd i over 30 år, og av den grunn inneholder oppgaven teoretiske elementer fra prosjektet [32].

OREDA begrenser seg til tilfeldige feilingsmekanismer. Alle enheter som inkluderes i statistikken forventes å være i den statiske perioden av den såkalte «badekarskurven». Det vil si at alle oppdagede feil forventes å inntreffe før slitasjeskader og aldri inntreffer. Dette medfører at man antar en konstant feilintensitet og ingen slitasjeskader [32].

4.10.2 FASIT

FASIT – Feil og avbrudd i total-systemet - ble opprettet i 1996 av en referansegruppe bestående av medlemmer fra NVE, Statnett og Energi Akademiet, i tillegg til nettselskapene. Sintef Energi er representert med prosjektleder for vedlikehold av FASIT-systemet og godkjenningstester. Referansegruppen har som oppgave å kontinuerlig utvikle FASIT-systemet og spre kunnskap om viktigheten av feil- og avbruddsstatistikk.

Det settes blant annet krav til anlegg (vern, feilskrivere, anleggsdeler, målere ol.). For å sikre at kravene oppfylles skal nettselskapene registrere svar på blant annet [33]:

- Feilsted
- Feilbeskrivelse og feilkarakter
- Årsak til feil
- Løste vern korrekt i henhold til plan?
- Fungerte øvrige kontrollfunksjoner etter plant (blant annet fjernstyring)?
- Reparasjoner, tiltak under og etter driftsforstyrrelsen
- Ble sluttbruker berørt av driftsforstyrrelsen?

Se vedlegg A for utfyllende liste over registreringspunkter.

NVE utleverer hvert år en oppdatert statistikk for avbruddsdata i det norske kraftsystemet. Statistikken bygger på årlig, fylkesfordelt innrapportering av data fra 131 nettselskap, hvor statistikken fremstiller avbrudd som ulike hendelser (driftsforstyrrelser og planlagte utkoplinger) i høyspentnettet. [34]

Statistikken som fremkommer av FASIT skal tilfredsstille de ulike interessegruppene: Nettkunder, NVE og Nettselskapene selv. Som nettkunde har en via energiloven krav på informasjon om leveringskvalitet i sitt område. NVE er avhengig av informasjonen for å kunne kontrollere blant annet at nettselskapene følger opp intensjonene som er nedskrevet i energiloven. I tillegg er nettselskapene avhengig av informasjonen i forbindelse med planlegging og bygging av nettet, samt kunne drive nettet effektivt. [34]

4.10.3 Komponent- og pålitelighetsdatabase

Hovedkomponenten i et pålitelighetsbasert vedlikeholdssystem er en database som inneholder all informasjon som trengs for å avdekke en enhets pålitelighet. Dette er en database som inkluderer alle observerte feil på spesifikke enheter i systemet. I følge OREDA bør den inneholde [32]:

- Grensesetting for enheten, altså hvilke underenheter som er inkludert i enheten, tegninger av hovedenheten og eventuelle underenheter og vedlikeholdbare deler.
- En liste over alle feilmodi, klassifisert som kritisk, degradert og begynnende, respektivt
- Antall observerte feil for hver feilmodus
- Den aggregerte observerte driftstiden for enheten, klassifisert som kalendertid, operasjonell tid og antall etterspøringer
- En estimering av feilraten for hver feilmodus med assosierte usikkerhetsgrenser
- Et reparasjonstidsestimat, altså antall arbeidstimer som behøves for å reparere feilen og tilbakeføre riktig funksjon
- Samme som over, men kun for faktisk reparasjonstid. Altså ikke tid fra feil til feilen er rettet, men aktiv reparasjonstid.
- Supportinformasjon: antall deler og installasjoner
- Innsamling og kalkulering av statistisk sviktdata

For å beregne et estimat for en enhets sviktintensitet benyttes følgende formel:

$$\hat{\lambda} = \frac{n}{\tau} = \frac{n}{t * N} \quad [4-43]$$

n = Antall feil i løpet av driftstiden, t

τ = Akkumulert driftstid i løpet av t , for alle operative enheter, N

Dette er en estimeringsmetode for et homogent datasett. Det vil si at vi kun har ett datasett, med lik driftstid og lik datamengde. I reelle situasjoner har man ofte forskjellige datasett, og det kan derfor bli aktuelt å kombinere ulike data for én sviktintensitet. OREDA har utviklet en metode for dette, den såkalte OREDA-estimatoren [32]:

- 1) Kalkuler et estimat for gjennomsnittlig feilrate

$$\hat{\theta}_1 = \frac{\text{Totalt antall feil}}{\text{Akkumulert driftstid}} = \frac{\sum_{i=1}^k n_i}{\sum_{i=1}^k \tau_i} \quad [4-44]$$

- 2) Kalkuler mellomvariabler

$$S_1 = \sum_{i=1}^k \tau_i \quad [4-45]$$

$$S_2 = \sum_{i=1}^k \tau_i^2 \quad [4-46]$$

$$V = \sum_{i=1}^k \frac{(n_i - \hat{\theta}_1 \tau_i)^2}{\tau_i} = \sum_{i=1}^k \frac{n_i^2}{\tau_i} - \hat{\theta}_1^2 S_1 \quad [4-47]$$

- 3) Kalkuler et estimat for variasjonen mellom datasettene

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{V - (k-1)\hat{\theta}_1^2}{S_1^2 - S_2} * S_1 \quad [4-48]$$

- 4) Kalkuler endelig estimat av gjennomsnittlig feilrate

$$\theta^* = \frac{1}{\sum_{i=1}^k \frac{1}{\frac{\hat{\theta}_1}{\tau_i} + \hat{\sigma}^2}} * \sum_{i=1}^k \left(\frac{1}{\frac{\hat{\theta}_1}{\tau_i} + \hat{\sigma}^2} * \frac{n_i}{\tau_i} \right) \quad [4-49]$$

- 5) Sviktintensitetsfordelingen $\pi(\lambda)$ antas å være gammafordelt:

$$\hat{\beta} = \frac{\theta^*}{\hat{\sigma}^2}, \quad \hat{\alpha} = \hat{\beta} * \theta^* \quad [4-50]$$

- 6) Øvre og nedre konfidensintervallgrenser (5- og 95-prosentil) settes

$$\text{nedre} = \frac{1}{2\hat{\beta}} z_{0,95,2\hat{\alpha}}, \quad \text{øvre} = \frac{1}{2\hat{\beta}} z_{0,05,2\hat{\alpha}} \quad [4-51]$$

hvor z er 95 % og 5 % -prosentil av χ^2 -fordelingen.

4.10.4 Innsamling av tekniske levetidsdata

Komponenter i luftnettet er, i mye høyere grad enn beskyttet maskineri, utsatt for aldring fra værprosesser. Nettkomponentene kan også tåle en del slitasje og fortsatt tilfredsstillende funksjonskravene. Disse komponentene befinner seg derfor i mye høyere grad i de eksponentielle delene av «badekarskurven» hvor sviktintensiteten er økende

Det er igjen viktig å nevne at vi må skille mellom tilfeldige feilingsmekanismer og slitasjerelaterte feilingsmekanismer. For å beregne teknisk levetid på en enhet er det nødvendig å vite hvor gammel enheten er ved slitasjefeil, og hvor lenge den har vært i bruk. Enhetens alder er tiden fra

produksjon/ferdigstilling og frem til slitasjerelatert feilingstidspunkt. Enhetens operasjonelle tid – hvor lenge den har vært i bruk – er den akkumulerte tiden som enheten har vært aktiv. For komponenter i luftnettet – hvis oppgave er enten å lede strøm innenfor et akseptabelt spenningsintervall, eller å skille en spenningspåkjent leder fra jord og andre faser – er den operasjonelle tiden tilnærmet lik tiden som har gått fra installasjonstidspunkt og frem til feiling.

En viktig del av grunnlaget for bestemmelse av teknisk levetid er korrekt identifisering av enhet. Det er derfor anbefalt at det utarbeides et enhetsregister med utfyllende informasjon om enheten. Relevant informasjon kan være fabrikant, fabrikkårsår, installasjonsår, komponenttype, geografisk plassering, materialtype, dimensjonering etc. [32]

4.10.5 Utforming av levetidsmodeller

En levetidsmodell er i denne oppgaven definert som en generisk matematisk funksjon som beskriver sannsynlighetsfordelingen for tiden til slitasjefeil for en enhet. Levetidsmodellen kan baseres på uendelig mange parametere, med den hensikt å gjøre modellen mer detaljert og mer beskrivende av virkeligheten. Uansett mengde parametere i modellen vil den alltid kun være en tilnærming til virkeligheten, og vil aldri kunne forutsi fremtiden med full nøyaktighet. Det må derfor alltid tas en avveining for å vurdere hva man får igjen for å øke detaljgraden på modellen, i forhold til kompleksiteten og kostnaden som følger med en slikt økte detaljgrad.

I denne oppgaven vil vi fokusere på bruk av Weibull-fordelingen for å forutsi en enhets levetid. Dataene som går inn i denne modellen er forventet teknisk levetid for den spesifikke enheten. For å finne Weibull-parameterne benyttes følgende sammenhenger:

$$\hat{c} = \frac{\sigma}{\mu} \quad [4-52]$$

$$m = \frac{1}{\hat{c}^{1.08}} \quad [4-53]$$

$$\theta = \frac{\hat{\mu}}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{m}\right)} \quad [4-54]$$

Ved å definere formparameter, m , og skaleringsparameter, θ , kan fordelingsfunksjonen defineres slik [4-17]:

$$f(t) = \frac{m}{\theta} \left(\frac{t}{\theta}\right)^{m-1} e^{-\left(\frac{t}{\theta}\right)^m}$$

Ut fra fordelingsfunksjonen kan vi definere den kumulative fordelingsfunksjonen $F(t)$ [4-19], pålitelighets-funksjonen $R(t)$ [4-20] og sviktfunksjonen $\lambda(t)$ [4-21]:

$$F(t) = \int_0^t f(x) dx = e^{-\left(\frac{t}{\theta}\right)^m}$$

$$R(t) = 1 - F(t)$$

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{F(t)} = \left(\frac{m}{\theta}\right) \left(\frac{t}{\theta}\right)^{m-1}$$

Det er viktig å nevne at prosedyren for å definere Weibull-parameterne er en tilnærming. Det kan også hende at Weibull-fordelingen ikke er den beste til å beskrive forventet teknisk levetid. Denne fordelingen er dog mye brukt i problemstillinger som omhandler levetid på tekniske komponenter, og vi velger derfor å benytte den i denne oppgaven [35].

Siden modellen er generisk for alle enhetene av samme type, uavhengig av belastning, plassering etc., er det nødvendig å oppdatere modellen etter en tilstandskontroll, for å kunne korrigere for høyere eller lavere slitasje enn standardmodellen. Dette blir i denne oppgaven løst ved å oppdatere modellens skaleringsparameter θ . Da tilstandskarakteren angir en viss pålitelighet for at enheten overlever et kommende tidsintervall, Δt , benyttes følgende sammenheng:

$$R(t + \Delta t) = e^{-\left(\frac{T + \Delta t}{\theta}\right)^m} \quad [4-55]$$

$$\theta = \frac{T + \Delta t}{\sqrt[m]{-\ln R(T + \Delta t)}} \quad [4-56]$$

Ved å justere tidsaksens nullpunkt til inspeksjonstidspunktet, T , vil den nye modellen angi forventet restlevetid for komponenten.

4.11 Økonomi og kapitalforvaltning

4.11.1 Reguleringsmodellen

Da nettselskapene er forvaltere av samfunnets ressurser, og ikke er konkurranseutsatt, er det nødvendig med økonomisk regulering for å sikre effektiv samfunnsøkonomisk forvaltning, investering og drift av ressursene.

For hvert kalenderår setter NVE ned en inntektsramme for hvert enkelt nettselskap, med hensikt om å regulere inntektene til selskapet. Nettselskapenes viktigste inntekt er nettleieinntektene, og via ordningen med **Tillatt inntekt** settes det et øvre tak på hvor mye nettselskapet kan kreve i nettleie av sine kunder. Inntektsrammen for et kalenderår vedtas ved utgangen av gjeldende år for at modellen skal kunne bruke riktig rente, kraftpris og inflasjon i sine beregninger. Det sendes imidlertid ut et varsel til nettselskapene, basert på estimer, ved inngangen av året.

Kostnadsnormen skal reflektere de normale kostnadene for et gjennomsnittsnettselskap i Norge. Normfaktoren for ett nettselskap beregnes ut fra et vektet snitt av andre nettselskap (kalt et «mønsterselskap»), og multipliseres så med det aktuelle nettselskapets **kostnadsgrunnlag**. Kostnadsgrunnlaget bestemmes ut fra karakteristikk ved nettet til nettselskapet – antall km høyspentledning, antall nettstasjoner og antall abonnementer (for distribusjonsnett) – og korrigeres ut fra rammevilkårene til selskapet, slik som avstand til vei, kystavstand, antall øyer, bonitet i skog, og andre driftsforhold. [36]

Hensikten med kostnadsnormen er å justere nettselskapenes kostnadsbruk ut fra bransjens gjennomsnittlige effektivitet. Kostnadsnormen teller 60 % i beregningen av inntektsrammen, og de resterende 40 % av kostnadene kommer fra selskapets eget regnskap.

4.11.2 Kvalitetsjusterte Inntektsrammer for ikke Levert Energi (KILE)

KILE-ordningen (Kvalitetsjusterte Inntektsrammer ved ikke Levert Energi) trådte i kraft 1. Januar 2001. Ordningen beregner de samfunnsøkonomiske kostnadene som blir påført brukerne av nettet ved avbrudd. Kostnadene reduserer inntektsrammen til energiselskapene som straff for ikke levert strøm. I 2009 gikk ordningen fra å gjelde avbrudd med varighet lenger enn 3 minutter til å gjelde alle avbrudd.

Ulike kunder har ulike kostnader ved brudd. Kostnadene varierer blant annet med varighet, klokkeslett, dato, om bruddet er varslet eller ikke varslet og strømtrekket til de berørte parter. Strømforbrukerne er klassifisert i kundegrupper, og for hver av kundegruppene er det utviklet en kostnadsfunksjon. Denne funksjonen reflekterer kundenes kostnader som funksjon av varighet. De seks forskjellige kundegruppene er jordbruk; husholdning; industri; handel og tjenester; offentlig virksomhet; industri med el-drevne prosesser.

4.11.3 Netto nåverdi

Netto nåverdi er verdiene av alle fremtidig periodevise resultater for et investeringsobjekt, diskontert til gjeldende år. Forskjell i avkastning mellom ulike prosjekter og inflasjon kan føre til at et pengebetalings utbetalt dag har høyere verdi enn et pengebetalings utbetalt om for eksempel fem år. Fremtidige avkastninger på en investering må derfor justeres for disse avkastningsforskjellene og inflasjonen. Netto nåverdi (NNV) kan vi beregne slik:

$$NNV = -C_0 + \sum_{n=1}^N \frac{R_n * (1 + i)^n}{(1 + k)^n} + \frac{S_N * (1 + i)^N}{(1 + k)^N} \quad [4-57]$$

| | | |
|-------|---|--|
| C_0 | = | Investeringsbeløp |
| R_n | = | Resultat i år n |
| i | = | Inflasjon per periode |
| k | = | Diskonteringsrente |
| S_N | = | Eventuell salgsinntekt ved slutten av investeringens levetid |

Diskonteringsrenten skal representere avkastningskravet for investoren, altså den forventede avkastningen en investor har på sin kapital. Dette er avkastningen som man alternativt kunne oppnådd om man investerte i et annet objekt. Denne er ofte risikojustert, ved at den risikofrie renten får et risikopåslag avhengig av usikkerheten i investeringen.

Gir beregningen en positiv netto nåverdi er investeringen lønnsom. Det vil si at investeringen gir en avkastning på innskutt kapital som er høyere eller lik diskonteringsrenten, k . En negativ netto nåverdi gir tilsvarende en avkastning som er lavere enn diskonteringsrenten.

Et annet lønnsomhetsmål som benyttes på investeringer er internrenten. Dette er definert som det avkastningskravet som gir en internrente lik null, altså den forventede avkastningen investeringen vil gi.

$$NNV = -C_0 + \sum_{n=1}^N \frac{R_n * (1 + i)^n}{(1 + x)^n} + \frac{S_N * (1 + i)^N}{(1 + x)^N} = 0 \quad [4-58]$$

Hvor internrenten er lik x . Internrenten interpoleres ut fra nåverdiberegningen for å gi en verdi som er tilnærmet korrekt.

4.11.4 Kost-nytte analyse

I en kost-nytte analyse – Cost Benefit Analysis (CBA) – forsøkes det å kvantifisere kostnader og nyttevirksomheter av ulike risikoreduserende tiltak for å avgjøre effektiviteten og prioriteringen av de forskjellige tiltakene. Vanligvis benyttes netto nåverdi-metoden for å beregne nettoverdien av et tiltak, hvor man diskonterer fremtidige kostnader og besparelser. Et tiltak ansees som å være «lønnsomt» eller effektivt hvis den beregnede netto nåverdien er positiv.

I tilfellet hvor kost-nytte av et risikoreduserende tiltak (RRM) skal beregnes må følgende tas med i vurderingen [37]:

1. Noen av kostnadene i beregningen er stokastiske – de er avhengige av sannsynligheter for gitte hendelser.
2. Det man ønsker å avdekke er nettovirkningen av å introdusere et risikoreduserende tiltak.
3. Det må skilles mellom ulike hendelser som gir Sikkerhetskonsekvens, Miljøkonsekvens og Operativ konsekvens

Vi kan da beregne netto-bidraget av et risikoreduserende tiltak slik:

$$\Delta LCC = \sum_{n=1}^N \frac{1}{(1+k)^n} \left[\sum_{j=1}^3 [\Delta C_{nj} * V_j(C)] - RC_n - IC_n \right] \quad [4-59]$$

ΔC_{nj} = Endring av forventet risiko ved innføring av RRM

$V(C)$ = Relasjon mellom hendelsekonsekvens og pengeverdi

ΔC er endringen av risiko som følge av innføring av et tiltak. Dette er en stokastisk størrelse:

$$\Delta C_{nj} = \sum_{i=1}^I [p_{nij}^i * C_{nij}^i - p_{nij}^{RRM} * C_{nij}^{RRM}] \quad [4-60]$$

p_{nij}^i = Sannsynligheten for hendelse i , i år n , og konsekvensdimensjon j , uten tiltak

C_{nij}^i = Konsekvens av hendelse i , i år n , og konsekvensdimensjon j , uten tiltak

p_{nij}^{RRM} = Sannsynligheten for hendelse i , i år n , og konsekvensdimensjon j , med tiltak

C_{nij}^{RRM} = Konsekvens av hendelse i , i år n , og konsekvensdimensjon j , med tiltak

Setter vi dette inn i ligning 4.10-3 får vi følgende:

$$\Delta LCC = \sum_{n=1}^N \frac{1}{(1+k)^n} \left[\sum_{j=1}^3 \left[\sum_{i=1}^I [p_{nij}^i * C_{nij}^i - p_{nij}^{RRM} * C_{nij}^{RRM}] * V_j(C) \right] - RC_n - IC_n \right] \quad [4-61]$$

Ligningen skiller mellom hvilken konsekvensdimensjon hendelsen faller i. Dette er for å kunne differensiere kostnadene forbundet med de ulike dimensjonene:

- Sikkerhet
- Miljø
- Operativ

Utfordringene med en slik beregning er å sette de riktige kostnadene på konsekvensene. Det er ofte mindre vanskelig å beregne kostnaden av en maskins nedetid, eller en ødelagt komponent. I sikkerhetsdimensjonen må man imidlertid kunne sette en verdi på menneskeliv for å gi riktige anbefalinger om tiltaket. En slik verdi er kontroversiell og vanskelig å kvantifisere, men nødvendig for å kunne beregne effekten av et risikoreducerende tiltak i sikkerhetsdimensjonen.

4.11.5 Levetidskostnader

Levetidskostnader – Life Cycle Costs (LCC) – er de totale kostnadene forbundet med et objekt over hele objektets levetid. Disse kostnadene inkluderer de initiale investeringskostnadene, løpende drifts- og vedlikeholdskostnader, og årlige investeringskostnader forbundet med objektet. Levetidskostnadene beregnes ut fra en nåverdi-beregning, som diskonterer fremtidige kostnader.

Hensikten med LCC-beregninger i et vedlikeholds-perspektiv er å kunne velge optimale vedlikeholdstiltak, basert på hva som minimerer den totale kostnaden over hele objektets levetid. For eksempel kan det være mer hensiktsmessig med en større initialinvestering for å minimere løpende drifts- og vedlikeholdskostnader, om levetidskostnadene viser seg å bli lavere.

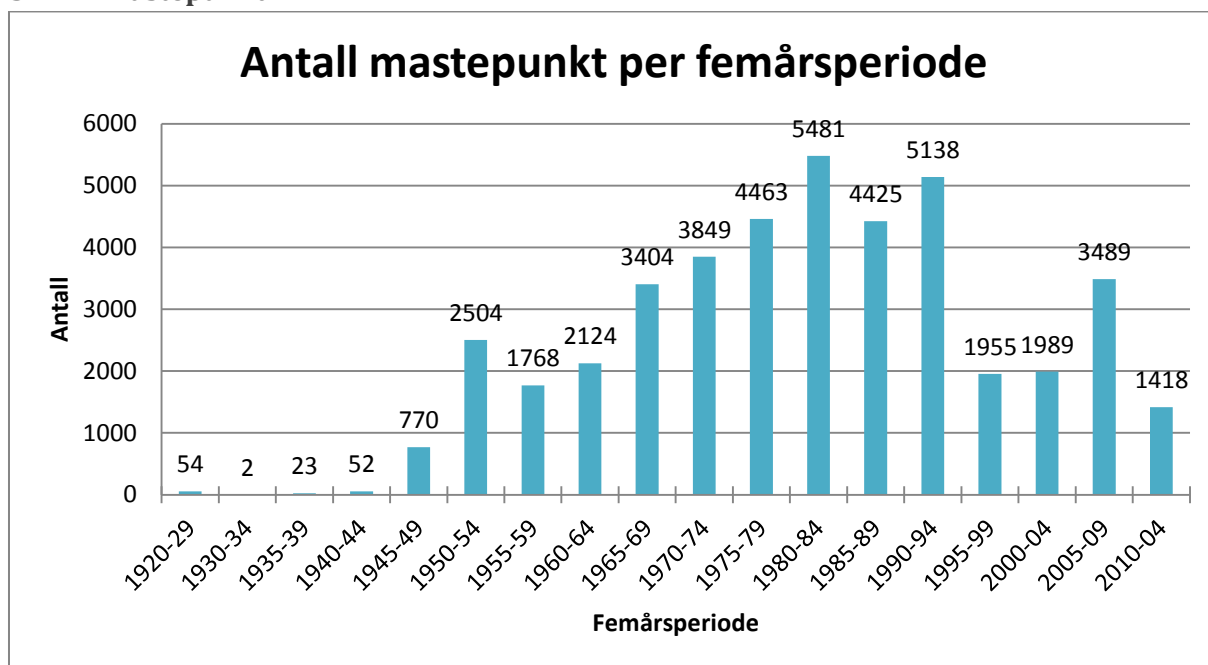
Kapittel 5: Statistisk analyse av systemer og driftsdata

I dette kapittelet presenteres de innsamlede dataene som har blitt brukt i oppgaven. Innsamlet data stammer hovedsakelig fra NetBas, FASIT og eksperter i bransjen. Vi har foreslått en deskriptiv statistikk som gir en oversikt over eksisterende anlegg med geografisk beliggenhet, aldersfordeling og svikterfaring. Denne oversikten anser vi som et nyttig verktøy i vurderingsprosessen.

5.1 Grafisk fremstilling av distribusjonsnett

For å gi en oversikt over luftnettets tilstand vil vi her presentere innsamlet data om nettet ved hjelp av grafer og diagrammer. Fremstillingen begrenser seg til mastepunkt og liner, da det ikke finnes tilgjengelig data på alle komponentnivå.

5.1.1 Mastepunkt



Figur 5-1: Antall mastepunkt per femårsperiode

Av figur 5-1 kan vi se at en stor andel av nettet ble bygget på 70- og 80-tallet. I følge tabell 5-1 utgjør disse tiårene over 40 % av luftnettets. Dette vil resultere i en bølge av fornyelser om 20-30 år, basert på levetidsforventningene.

Tabell 5-1: Antall og andel mastepunkt per tiårsperiode

| | 1920-29 | 1930-39 | 1940-49 | 1950-59 | 1960-69 | 1970-79 | 1980-89 | 1990-99 | 2000-09 | 2010-19 | Totalt |
|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|--------|
| Antall | 54 | 25 | 822 | 4 272 | 5 528 | 8 312 | 9 906 | 7 093 | 5 478 | 1 418 | 42 908 |
| Andel | 0,1% | 0,1% | 1,9% | 10,0% | 12,9% | 19,4% | 23,1% | 16,5% | 12,8% | 3,3% | 100,0% |

Tabell 5-2 fremviser antall mastepunkt for de ulike kommunene i konsesjonsområdet til Agder Energi Nett. Tabellen fremviser antall mastepunkt fordelt på tiårsperioder, og gir innsikt i det totale antallet mastepunkt per kommune. Av tabellen ser man for eksempel at 1034 Hægebostad-kommune totalt har 13 % av sine mastepunkter fra år 1940-1949, som tilsier at mastepunktene er mellom 66 og 75 år gamle.

| | 0901 RISØR | 0904 GRIMSTAD | 0906 ARENDAL | 0911 GJERSTAD | 0912 VEGÅRSHEI | 0914 TVEDESTRAND | | | | | | |
|-----------------|-------------|---------------|--------------|---------------|----------------|------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 1920-29 | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | | | | | | |
| 1930-39 | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | | | | | | |
| 1940-49 | 0% | 23 | 1% | 0% | 0% | 1 | | | | | | |
| 1950-59 | 27 | 77 | 4% | 87 | 3% | 1 | 0% | 72 | 6% | | | |
| 1960-69 | 32 | 3% | 140 | 7% | 550 | 21% | 147 | 21% | 147 | 19% | 34 | 3% |
| 1970-79 | 193 | 16% | 493 | 24% | 949 | 36% | 279 | 39% | 254 | 33% | 219 | 17% |
| 1980-89 | 326 | 27% | 351 | 17% | 531 | 20% | 44 | 6% | 32 | 4% | 509 | 39% |
| 1990-99 | 241 | 20% | 266 | 13% | 335 | 13% | 45 | 6% | 34 | 4% | 242 | 19% |
| 2000-09 | 292 | 24% | 588 | 29% | 158 | 6% | 163 | 23% | 231 | 30% | 201 | 15% |
| 2010-19 | 94 | 8% | 76 | 4% | 61 | 2% | 34 | 5% | 2 | 0% | 26 | 2% |
| Totalsum | 1205 | 2014 | 2671 | 713 | 771 | 1304 | | | | | | |

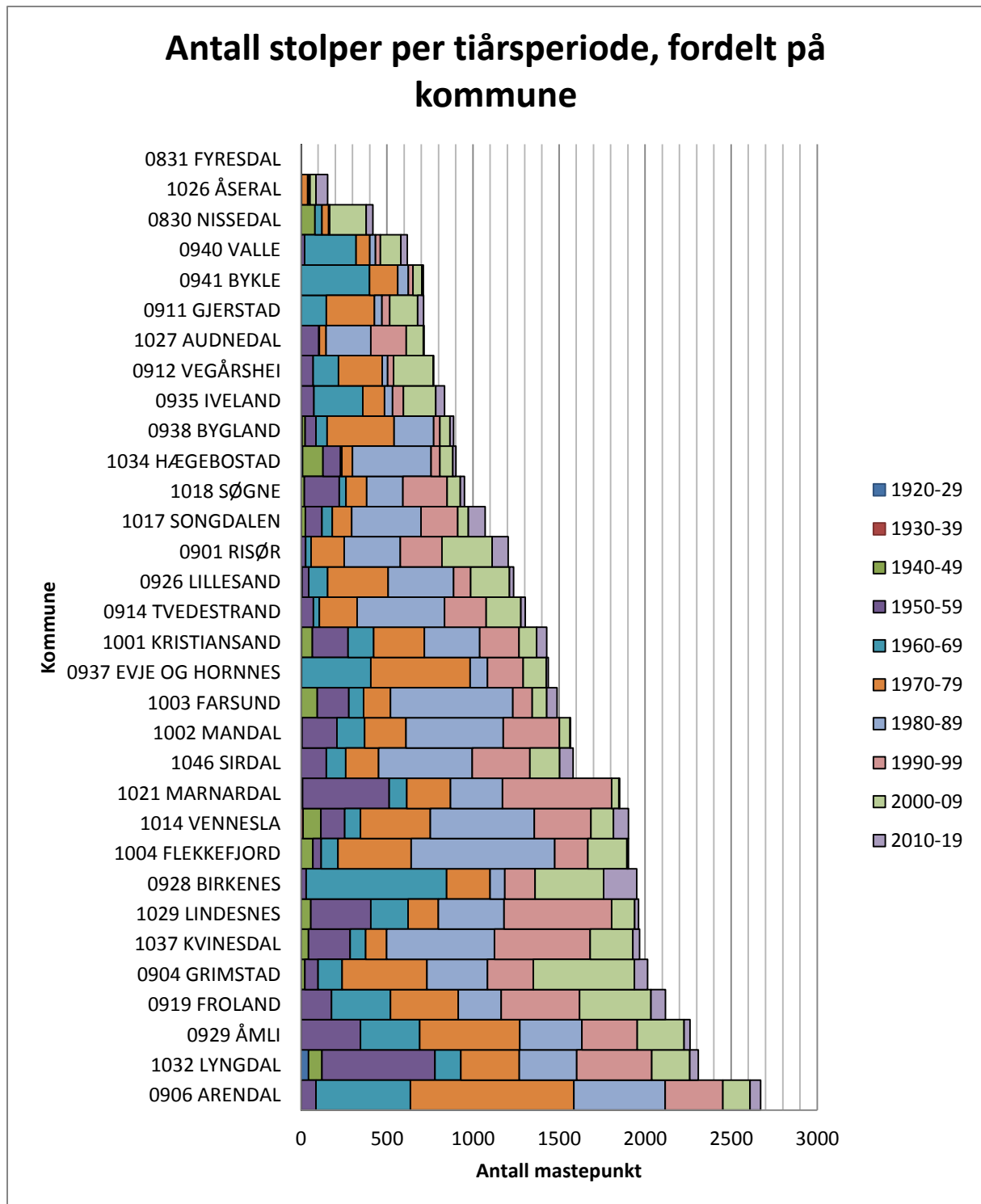
| | 0919 FROLAND | 0926 LILLESAND | 0928 BIRKENES | 0929 ÅMLI | 0935 IVELAND | 0937 EVJE OG HORNNES | | | | | | |
|-----------------|--------------|----------------|---------------|-------------|--------------|----------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 1920-29 | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | | | | | | |
| 1930-39 | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | | | | | | |
| 1940-49 | 0% | 7 | 1% | 0% | 0% | 0% | | | | | | |
| 1950-59 | 178 | 8% | 38 | 3% | 30 | 2% | 346 | 15% | 76 | 9% | 3 | 0% |
| 1960-69 | 343 | 16% | 111 | 9% | 817 | 42% | 345 | 15% | 284 | 34% | 403 | 28% |
| 1970-79 | 394 | 19% | 351 | 28% | 252 | 13% | 581 | 26% | 126 | 15% | 577 | 40% |
| 1980-89 | 249 | 12% | 380 | 31% | 86 | 4% | 361 | 16% | 47 | 6% | 101 | 7% |
| 1990-99 | 455 | 21% | 99 | 8% | 176 | 9% | 322 | 14% | 62 | 7% | 207 | 14% |
| 2000-09 | 415 | 20% | 226 | 18% | 398 | 20% | 272 | 12% | 189 | 23% | 135 | 9% |
| 2010-19 | 84 | 4% | 24 | 2% | 193 | 10% | 34 | 2% | 50 | 6% | 11 | 1% |
| Totalsum | 2118 | 1236 | 1952 | 2261 | 834 | 1437 | | | | | | |

| | 0938 BYGLAND | 0940 VALLE | 0941 BYKLE | 1001 KRISTIANSAND | 1002 MANDAL | 1003 FARSUND | | | | | | |
|-----------------|--------------|------------|------------|-------------------|-------------|--------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 1920-29 | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | | | | | | |
| 1930-39 | 7 | 1% | 0% | 0% | 4 | 0% | | | | | | |
| 1940-49 | 18 | 2% | 0% | 0% | 63 | 4% | 7 | 0% | 95 | 6% | | |
| 1950-59 | 63 | 7% | 21 | 3% | 1 | 0% | 207 | 14% | 202 | 13% | 183 | 12% |
| 1960-69 | 65 | 7% | 299 | 48% | 398 | 56% | 149 | 10% | 161 | 10% | 87 | 6% |
| 1970-79 | 388 | 44% | 81 | 13% | 164 | 23% | 294 | 21% | 241 | 15% | 155 | 10% |
| 1980-89 | 231 | 26% | 33 | 5% | 61 | 9% | 322 | 23% | 565 | 36% | 712 | 48% |
| 1990-99 | 36 | 4% | 28 | 5% | 28 | 4% | 228 | 16% | 326 | 21% | 112 | 8% |
| 2000-09 | 58 | 7% | 118 | 19% | 50 | 7% | 103 | 7% | 62 | 4% | 85 | 6% |
| 2010-19 | 21 | 2% | 38 | 6% | 9 | 1% | 58 | 4% | 3 | 0% | 59 | 4% |
| Totalsum | 887 | 618 | 711 | 1428 | 1567 | 1488 | | | | | | |

| | 1004 FLEKKEFJORD | 1014 VENNESLA | 1017 SONGDALEN | 1018 SØGNE | 1021 MARNARDAL | 1026 ÅSERAL | | | | | | |
|-----------------|------------------|---------------|----------------|------------|----------------|-------------|-----|-----|-----|-----|----|-----|
| 1920-29 | 0% | 1 | 0% | 0% | 0% | 0% | | | | | | |
| 1930-39 | 0% | 12 | 1% | 0% | 0% | 0% | | | | | | |
| 1940-49 | 70 | 4% | 104 | 5% | 24 | 2% | 20 | 2% | 10 | 1% | 0% | |
| 1950-59 | 48 | 3% | 137 | 7% | 97 | 9% | 203 | 21% | 503 | 27% | 0% | |
| 1960-69 | 97 | 5% | 92 | 5% | 60 | 6% | 39 | 4% | 102 | 6% | 3 | 2% |
| 1970-79 | 426 | 22% | 406 | 21% | 112 | 10% | 120 | 13% | 254 | 14% | 37 | 24% |
| 1980-89 | 834 | 44% | 605 | 32% | 403 | 38% | 211 | 22% | 302 | 16% | 5 | 3% |
| 1990-99 | 193 | 10% | 328 | 17% | 214 | 20% | 257 | 27% | 635 | 34% | 8 | 5% |
| 2000-09 | 227 | 12% | 131 | 7% | 61 | 6% | 76 | 8% | 42 | 2% | 34 | 22% |
| 2010-19 | 8 | 0% | 87 | 5% | 97 | 9% | 25 | 3% | 5 | 0% | 69 | 44% |
| Totalsum | 1903 | 1903 | 1070 | 951 | 1853 | 156 | | | | | | |

| | 1027 AUDNEDAL | 1029 LINDSNES | 1032 LYNGDAL | 1034 HÆGEBOSTAD | 1037 KVINESDAL | 1046 SIRDAL | | | | | | |
|-----------------|---------------|---------------|--------------|-----------------|----------------|-------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 1920-29 | 0% | 0% | 44 | 2% | 9 | 1% | 0% | 0% | | | | |
| 1930-39 | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | | | | | |
| 1940-49 | 0% | 57 | 3% | 78 | 3% | 119 | 13% | 44 | 2% | 1 | 0% | |
| 1950-59 | 104 | 15% | 349 | 18% | 657 | 28% | 102 | 11% | 242 | 12% | 147 | 9% |
| 1960-69 | 3 | 0% | 217 | 11% | 150 | 6% | 8 | 1% | 91 | 5% | 112 | 7% |
| 1970-79 | 39 | 5% | 175 | 9% | 340 | 15% | 61 | 7% | 121 | 6% | 191 | 12% |
| 1980-89 | 260 | 36% | 383 | 20% | 334 | 14% | 457 | 51% | 627 | 32% | 544 | 34% |
| 1990-99 | 207 | 29% | 625 | 32% | 435 | 19% | 52 | 6% | 556 | 28% | 335 | 21% |
| 2000-09 | 98 | 14% | 134 | 7% | 221 | 10% | 75 | 8% | 248 | 13% | 174 | 11% |
| 2010-19 | 5 | 1% | 22 | 1% | 50 | 2% | 18 | 2% | 39 | 2% | 78 | 5% |
| Totalsum | 716 | 1962 | 2309 | 901 | 1968 | 1582 | | | | | | |

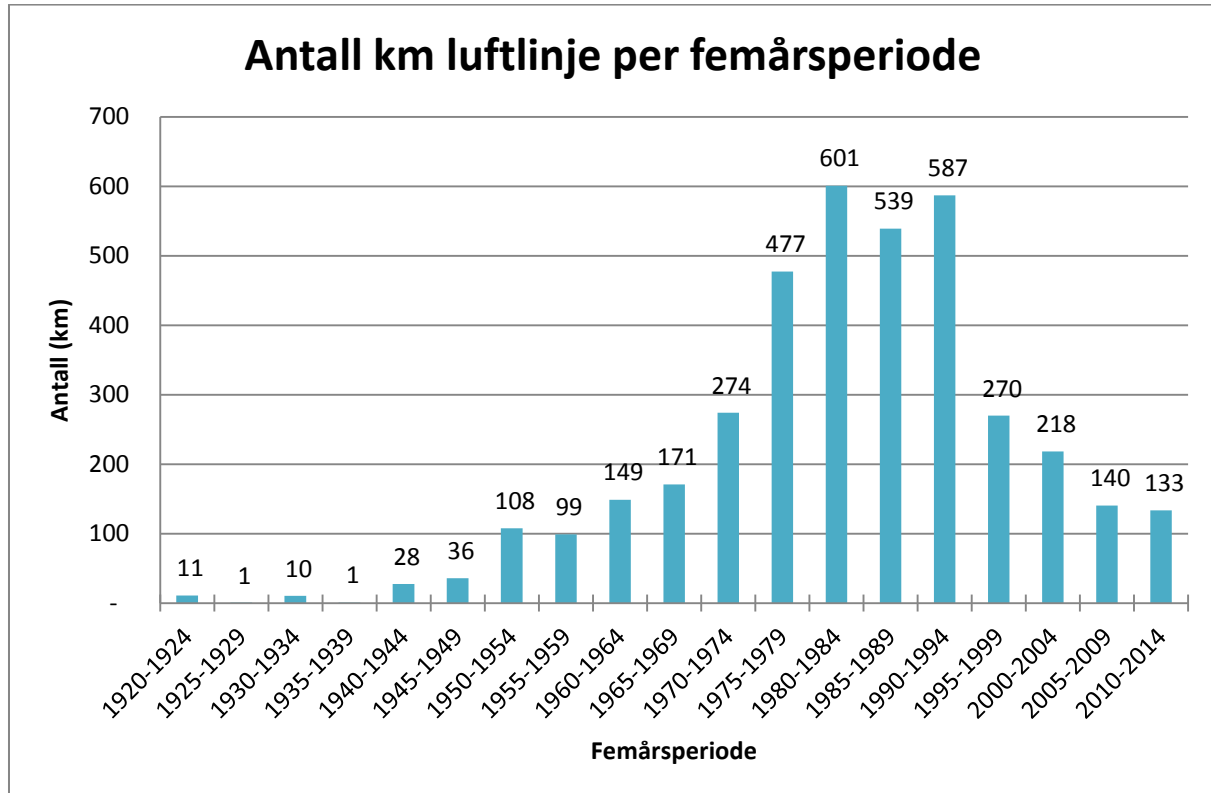
Tabell 5-2: Antall mastepunkt per kommune, fordelt på tiårsperioder



Figur 5-2: Antall mastepunkt per tiårsperiode, fordelt på kommune

Figur 5-2 presenterer antall mastepunkt per tiårsperiode, fordelt på kommuner. Figuren viser blant annet at 0906 Arendal totalt har flest mastepunkt, hvor den største andelen mastepunkt er fra 1970-1979. Grimstad kommune har 713 mastepunkt, med flest mastepunkt fra tiårsintervallet 2000-2009.

5.1.2 Luftlinje



Figur 5-3: Antall linjekilometer per femårsperiode

Av figur 5-3 kan vi se at en stor andel av nettet ble bygget på 70- og 80-tallet. I følge tabell 5-3 utgjør disse tiårene over 50 % av antall kilometer luftlinje. Dette er naturlig nok stort sett i samsvar med det som ble funnet for mastepunktene, og vil føre til de samme utfordringene.

Tabell 5-3: Antall og andel kilometer luftlinje per tiårsperiode

| | 1920-29 | 1930-39 | 1940-49 | 1950-59 | 1960-69 | 1970-79 | 1980-89 | 1990-99 | 2000-09 | 2010-19 | Totalt |
|---------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|---------|---------|---------|----------|
| Antall | 11,73 | 11,41 | 63,63 | 206,72 | 319,59 | 751,39 | 1 139,88 | 856,94 | 358,49 | 133,34 | 3 853,11 |
| Andel | 0,3 % | 0,3 % | 1,7 % | 5,4 % | 8,3 % | 19,5 % | 29,6 % | 22,2 % | 9,3 % | 3,5 % | 100,0 % |

Tabell 5-4 viser antall linjekilometer fordelt på de ulike kommunene i konsesjonsområdet til Agder Energi Nett. Tabellen illustrer antall linjekilometer fordelt på tiår og gir en innsikt i alderssammensetningen til linjene i de ulike kommunene. Undersøker man Bygland-kommunene ser at hele 10 % av den totale antallet kilometer med line for kommunen består av linjer fra år 1930-1939, som betyr at linjene i dag er mellom 76 og 85 år. I andre delen av skalaen ser en at Åseral-kommune i stor grad består av nyere linjer, hvor de eldste linjene er i fra 1960-1969.

| | 0901 RISØR | 0904 GRIMSTAD | 0906 ARENDAL | 0911 GJERSTAD | 0912 VEGÅRSHEI | 0914 TVEDESTRAND |
|-----------------|------------|---------------|--------------|---------------|----------------|------------------|
| 1920-29 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1930-39 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1940-49 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 1950-59 | 1 | 8 | 11 | 6 | 17 | 4 |
| 1960-69 | 2 | 17 | 34 | 7 | 10 | 4 |
| 1970-79 | 17 | 39 | 73 | 18 | 17 | 22 |
| 1980-89 | 32 | 34 | 54 | 6 | 8 | 55 |
| 1990-99 | 20 | 15 | 29 | 6 | 1 | 25 |
| 2000-09 | 16 | 10 | 13 | 6 | 13 | 6 |
| 2010-19 | 4 | 4 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| Totalsum | 92 | 127 | 217 | 48 | 67 | 115 |

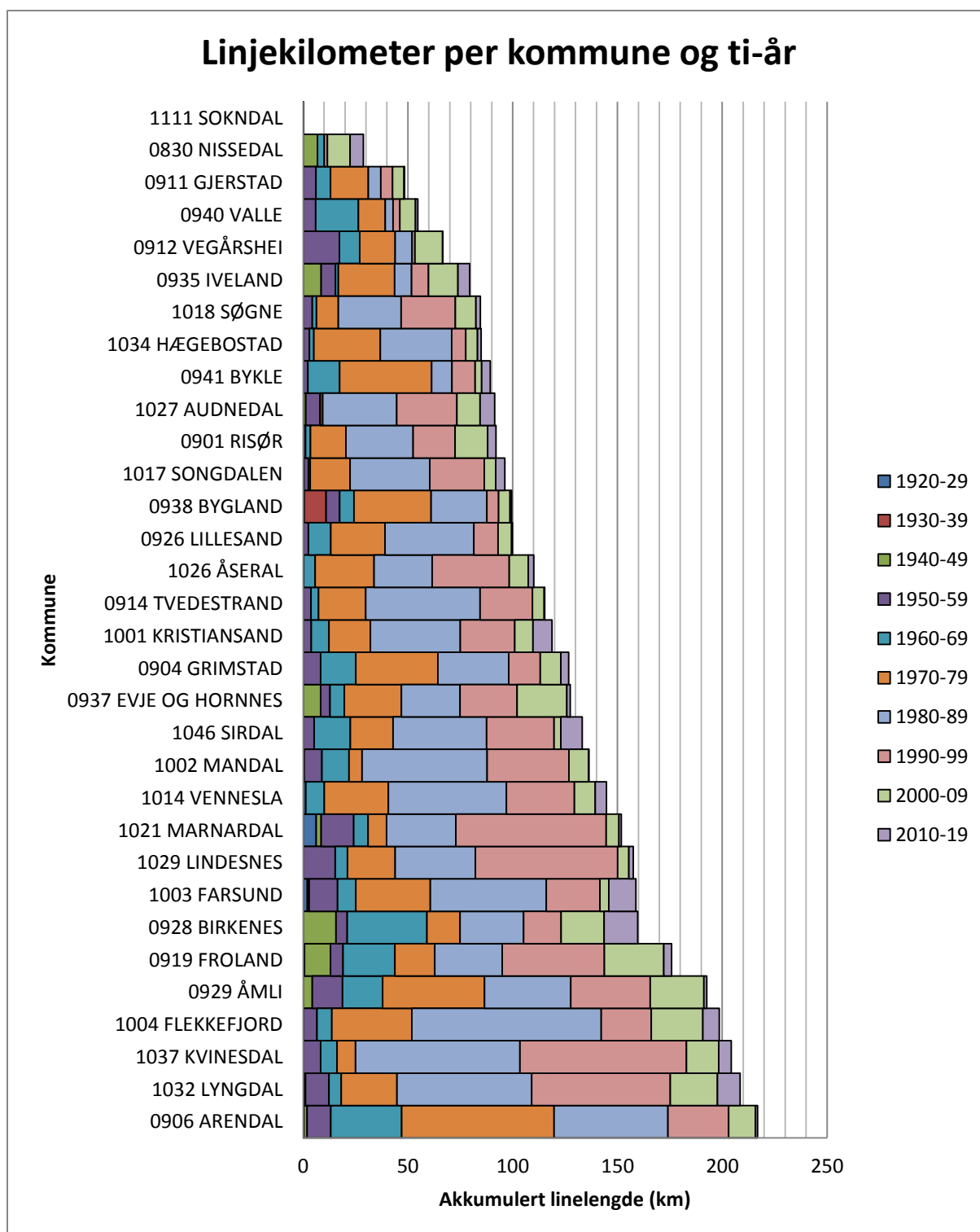
| | 0919 FROLAND | 0926 LILLESAND | 0928 BIRKENES | 0929 ÅMLI | 0935 IVELAND | 0937 EVJE OG HORNNES |
|-----------------|--------------|----------------|---------------|------------|--------------|----------------------|
| 1920-29 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1930-39 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1940-49 | 12 | 0 | 16 | 4 | 9 | 8 |
| 1950-59 | 6 | 2 | 5 | 14 | 7 | 4 |
| 1960-69 | 25 | 11 | 38 | 19 | 1 | 7 |
| 1970-79 | 19 | 26 | 16 | 49 | 27 | 27 |
| 1980-89 | 32 | 42 | 30 | 41 | 8 | 28 |
| 1990-99 | 49 | 11 | 18 | 38 | 8 | 27 |
| 2000-09 | 28 | 6 | 21 | 26 | 14 | 24 |
| 2010-19 | 4 | 0 | 16 | 1 | 6 | 2 |
| Totalsum | 176 | 100 | 160 | 193 | 79 | 127 |

| | 0938 BYGLAND | 0940 VALLE | 0941 BYKLE | 1001 KRISTIANSAND | 1002 MANDAL | 1003 FARSUND |
|-----------------|--------------|------------|------------|-------------------|-------------|--------------|
| 1920-29 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 2 |
| 1930-39 | 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1940-49 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 1950-59 | 6 | 6 | 2 | 4 | 8 | 14 |
| 1960-69 | 7 | 20 | 15 | 8 | 13 | 9 |
| 1970-79 | 37 | 13 | 44 | 20 | 6 | 36 |
| 1980-89 | 27 | 4 | 10 | 43 | 60 | 55 |
| 1990-99 | 6 | 3 | 11 | 26 | 39 | 26 |
| 2000-09 | 5 | 8 | 3 | 9 | 9 | 4 |
| 2010-19 | 1 | 1 | 4 | 9 | 0 | 13 |
| Totalsum | 99 | 55 | 89 | 119 | 136 | 159 |

| | 1004 FLEKKEFIJORD | 1014 VENNESLA | 1017 SONGDALEN | 1018 SØGNE | 1021 MARNARDAL | 1026 ÅSERAL |
|-----------------|-------------------|---------------|----------------|------------|----------------|-------------|
| 1920-29 | 0 | 1 | 0 | 0 | 6 | 0 |
| 1930-39 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1940-49 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 |
| 1950-59 | 7 | 0 | 2 | 4 | 16 | 0 |
| 1960-69 | 7 | 9 | 1 | 2 | 7 | 5 |
| 1970-79 | 38 | 31 | 19 | 10 | 9 | 28 |
| 1980-89 | 90 | 56 | 38 | 30 | 33 | 28 |
| 1990-99 | 24 | 33 | 26 | 26 | 72 | 37 |
| 2000-09 | 25 | 10 | 6 | 10 | 6 | 9 |
| 2010-19 | 8 | 5 | 4 | 2 | 1 | 3 |
| Totalsum | 199 | 145 | 96 | 85 | 152 | 110 |

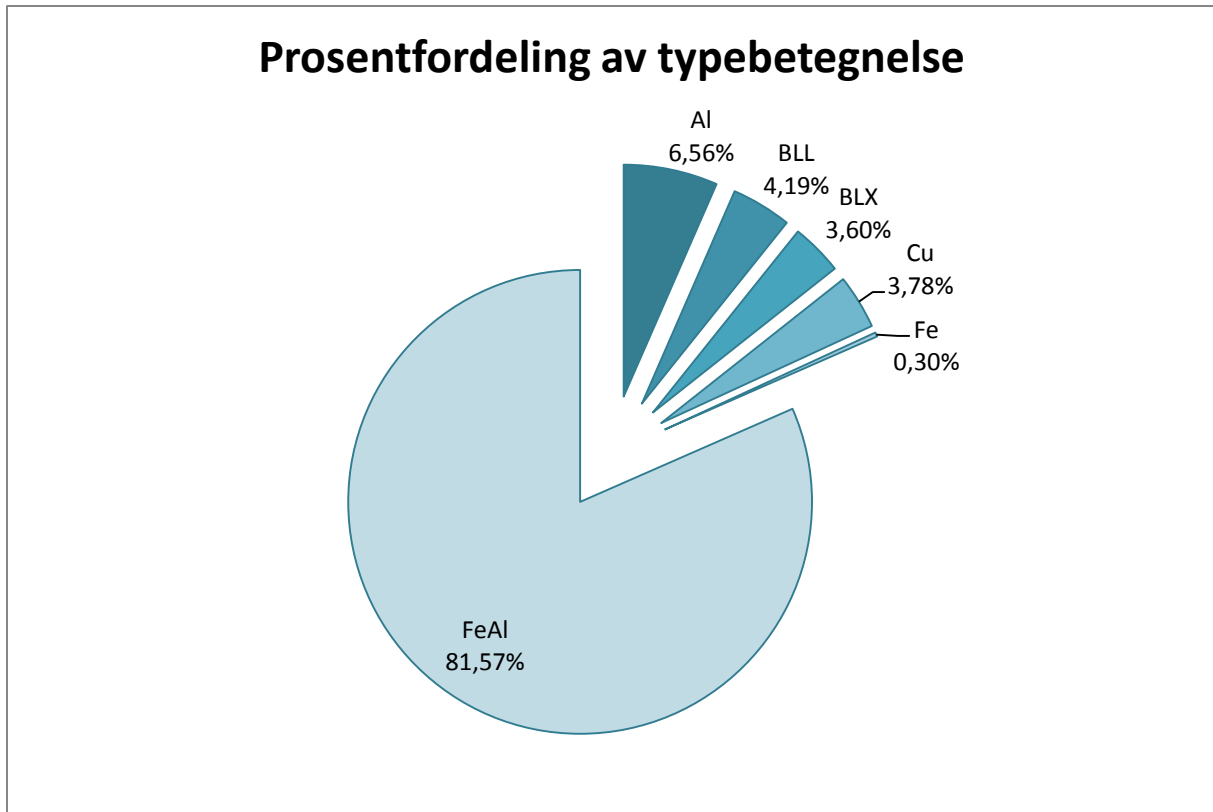
| | 1027 AUDNEDAL | 1029 LINDESNES | 1032 LYNGDAL | 1034 HÆGEBOSTAD | 1037 KVINESDAL | 1046 SIRDAL |
|-----------------|---------------|----------------|--------------|-----------------|----------------|-------------|
| 1920-29 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1930-39 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1940-49 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 1950-59 | 7 | 15 | 11 | 3 | 8 | 5 |
| 1960-69 | 0 | 6 | 6 | 2 | 8 | 17 |
| 1970-79 | 1 | 23 | 27 | 32 | 9 | 20 |
| 1980-89 | 35 | 38 | 64 | 34 | 78 | 45 |
| 1990-99 | 29 | 68 | 66 | 7 | 79 | 32 |
| 2000-09 | 11 | 5 | 23 | 6 | 15 | 3 |
| 2010-19 | 7 | 2 | 11 | 2 | 6 | 10 |
| Totalsum | 91 | 158 | 209 | 85 | 204 | 133 |

Tabell 5-4: Antall linjekilometer per kommune, fordelt på tiårsperioder



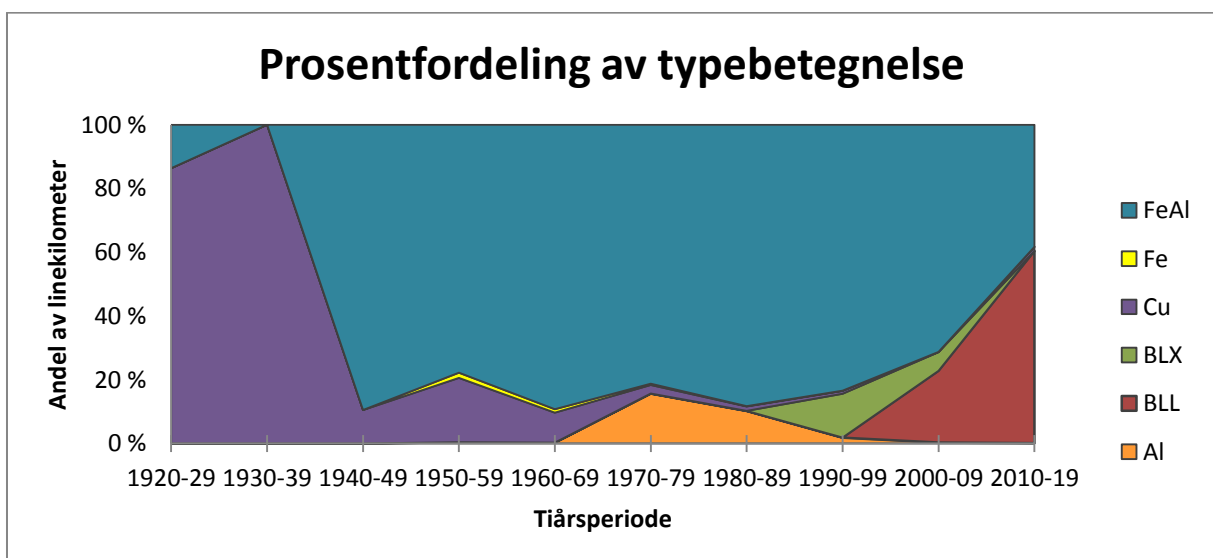
Figur 5-4: Antall linjekilometer per kommune og ti-år

Figur 5-4 viser en fremstilling av antall linjekilometer per tiårsperiode, fordelt på kommuner. Figuren kan sees i sammenheng med antall mastepunkt per kommune, men sammenlikner man 0904 Grimstad kommune med mastepunkt og linjekilometer ser en at Grimstad kommune ikke har den samme plassen. Dette kommer av variasjon i lengden på linjespennene. En annen årsak kan være bruken av hengekabler. Stolper registrert med hengekabel er inkludert i statikken, men ettersom hengekabel er definert som kabel og ikke kraftlinje vil ikke linjekilometerne registreres for disse.



Figur 5-5: Andel av nettet fordelt på line-materiale

Figur 5-5 viser prosentfordelingen av linemateriale for luftnettet. Figuren viser at FeAl er det dominerende linematerialet med en prosentandel på hele 81,57 %. Cu og Fe er det eldste linematerialet som Agder Energi Nett har i drift i nettet, og det er stort ønske om å redusere antallet Cu- og Fe-linjer. Dette fordi disse linene erfaringsmessig er dårligere, stort sett pga. lav mekanisk og elektrisk dimensjonering i forhold til dagens last.



Figur 5-6: Andel av linemateriale per tiårsperiode

Av figur 5-6 kan vi se at materialtypen som brukes for linjen er ulikt fordelt basert på linjens alder. Blant annet kan vi se at de eldre linene gjerne ble konstruert av kobber eller FeAl, mens dagens

standard linetype hos AE Nett er BLL og FeAl. Vi ser også at et svært lite antall liner har blitt konstruert av Fe(stål)-wire. Fordelingen kan enten komme av:

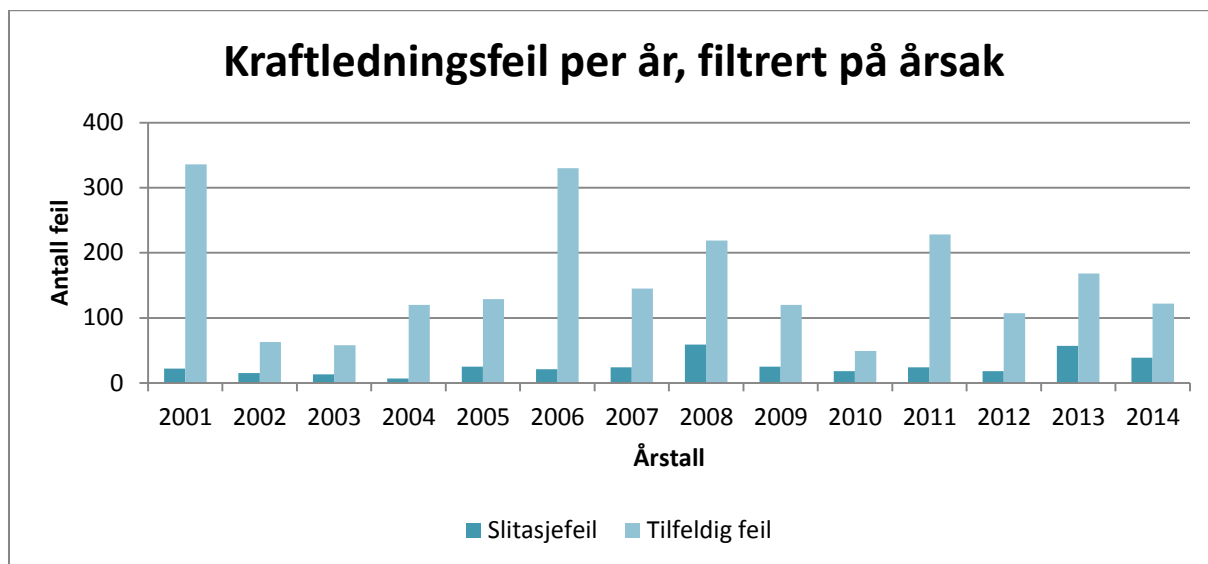
- 1) At den foretrukne linetypen har endret seg over tid
- 2) At enkelte av linematerialene har en lengre levetid
- 3) En kombinasjon av disse to

Vi vet at en del eldre liner konstruert av stål og små FeAl-tverrsnitt har blitt prioritert utskiftet av nettet [12]. Samtidig vet vi også at kobber-linene har lang levetid, sannsynligvis pga. det beskyttende laget av kobberoksid. Dette kan tale for at det sannsynligvis er en kombinasjon av begge faktorer.

Av figuren ser vi også at det i de senere år har kommet nye liner av typen BLX og BLL. Da oppgavens fokus er fornyelse og vedlikehold av linjer som grunnet aldring har fått redusert tilstand faller disse line-typene ut av oppgavefokus, pga. den lave alderen. Vi har derfor valgt å ikke lage egne beskrivelser for tilstandsvurdering av disse linene da det er lite sannsynlig at man kommer over slike i nærmeste fremtid. Vi anbefaler likevel Agder Energi Nett å utforske hvordan disse linene bør tilstandsvurderes, og om det finnes særskilte feilingsmekanismer for disse linetypene.

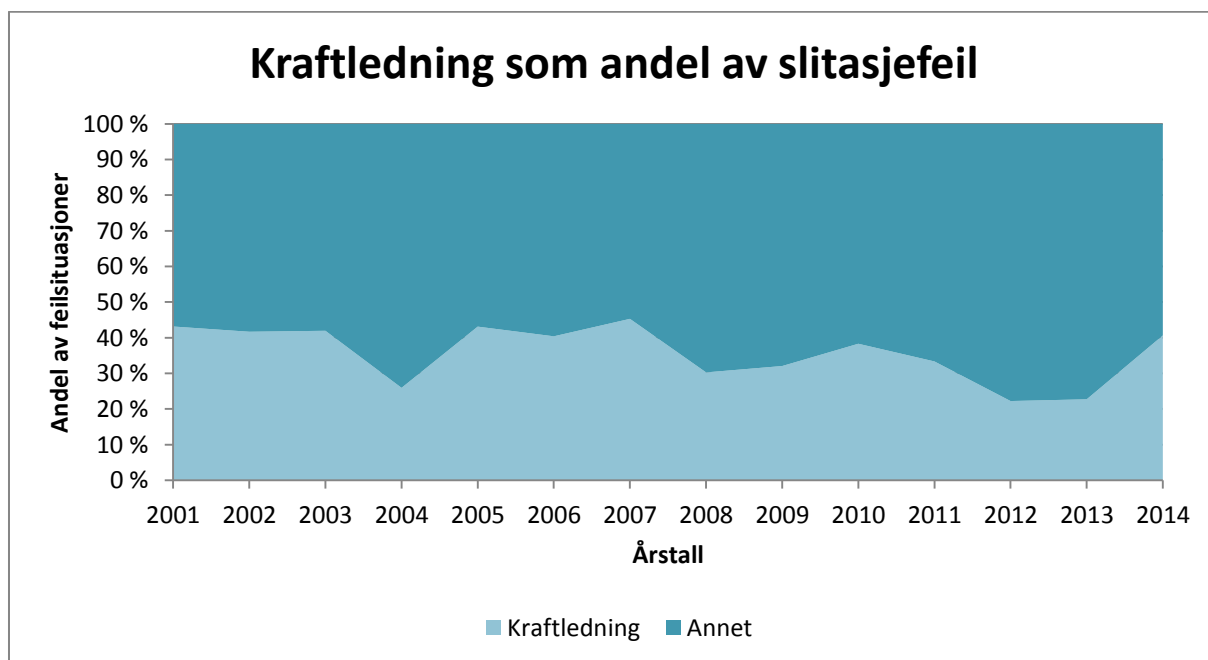
5.2 Grafisk presentasjon av feilstatistikk

I dette kapittelet vil vi presentere en oversikt over feilstatikken utlevert av Agder Energi Nett. Det har blitt tatt en avgjørelse om å presentere feilene oppdelt i slitasje (økende feilrate, IFR) og tilfeldige feil (konstant feilrate, CFR). Grunnlaget for denne avgjørelsen kommer av ulike sviktintensiteter og tilhørende vedlikeholdstiltak. Se figur 4-16 i kapittel 4.7.



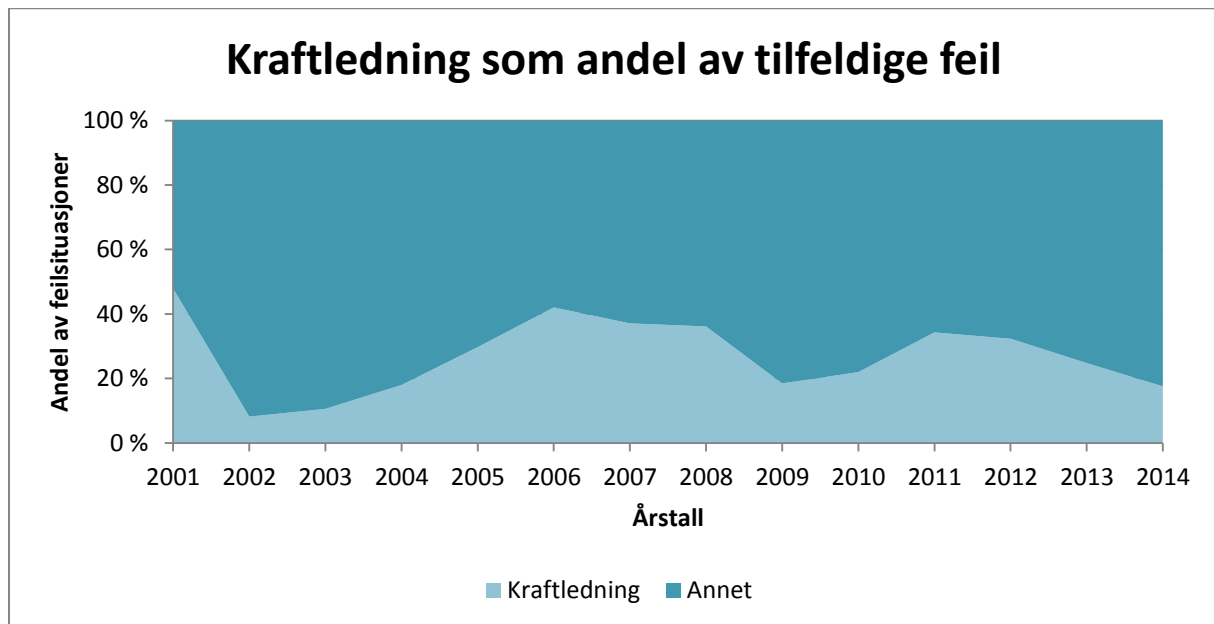
Figur 5-7: Antall feil sortert på Kraftledning, filtrert på årsak.

Oppgavens hovedfokus gjelder for kraftledningsfeil og figur 5-7 fremstiller slitasjefeil og tilfeldig feil for kraftledning per år. Her dominerer tilfeldige feil. Tilfeldige feil vil typisk være trær som faller på linjen, lyn og tordenvær, snølast, vind, fugler etc.



Figur 5-8: Kraftledning som andel av slitasjefeil.

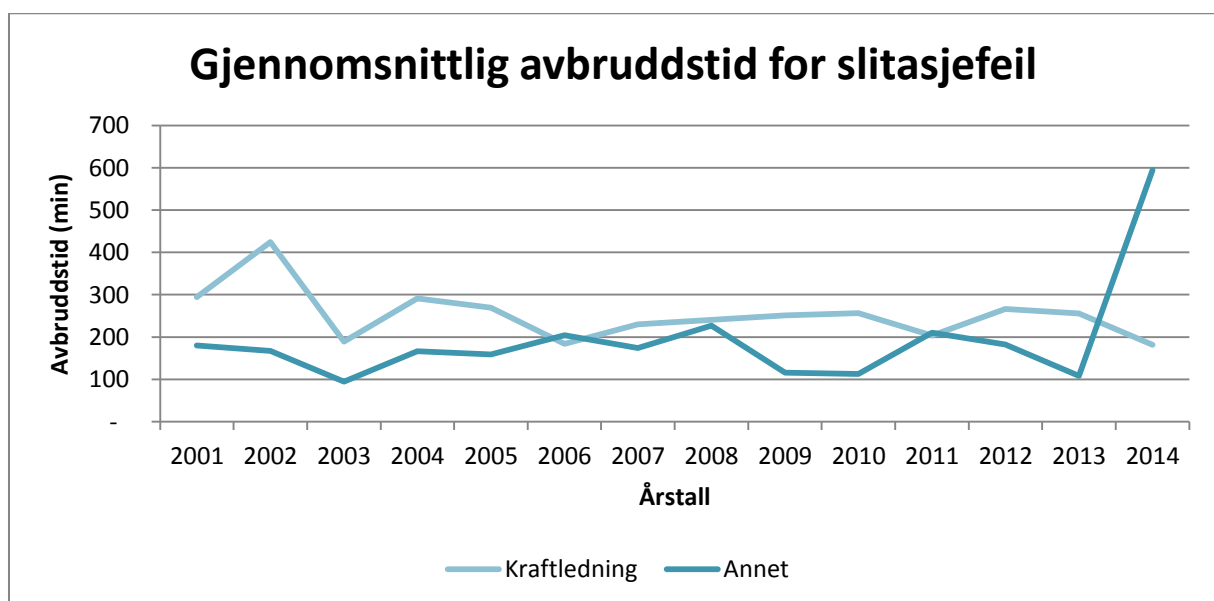
Figur 5-8 fremstiller andel av kraftledningsfeil opp for alle slitasjerelaterte feil. Av figuren ser en at feil på kraftledning står for 30 % til 40 % av alle slitasjerelaterte feil fra 2001 og frem til 2014. Kraftledning er således utsatt for slitasjefeil.



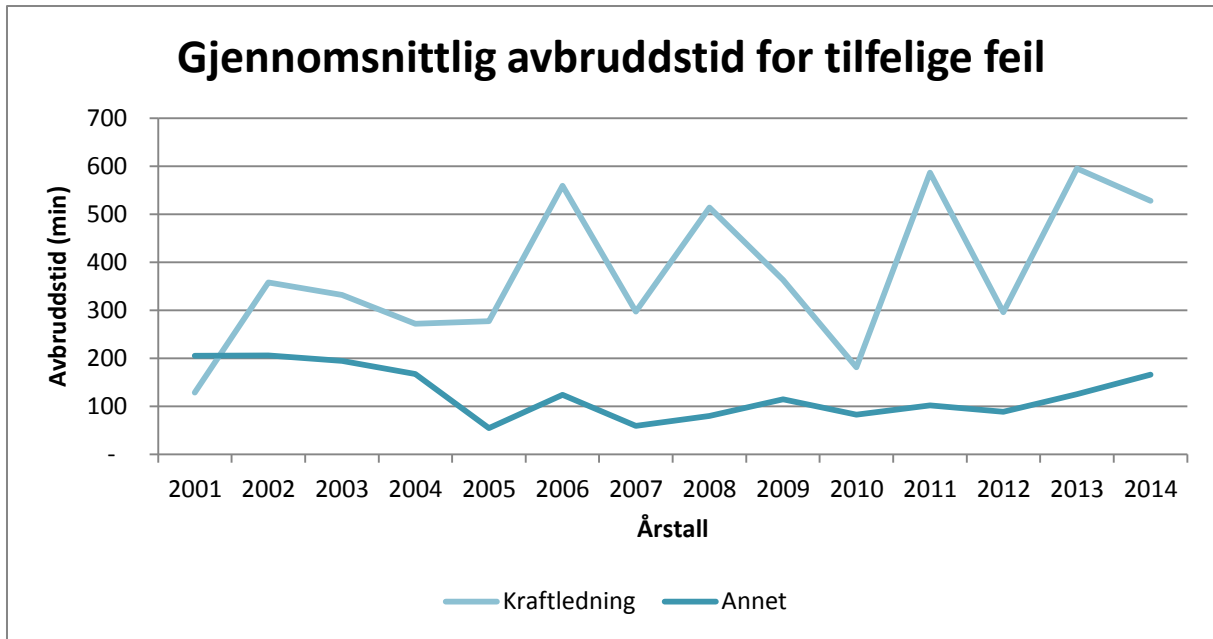
Figur 5-9: Kraftledningsfeil som andel av tilfeldige feil.

Figur 5-9 fremstiller andel av kraftledningsfeil for alle tilfeldige feil. Kraftledning innehar ikke en konstant andel av tilfeldige feil per år, sannsynligvis fordi luftnettet er mer utsatt i år med mye storm. Andelen vil således variere.

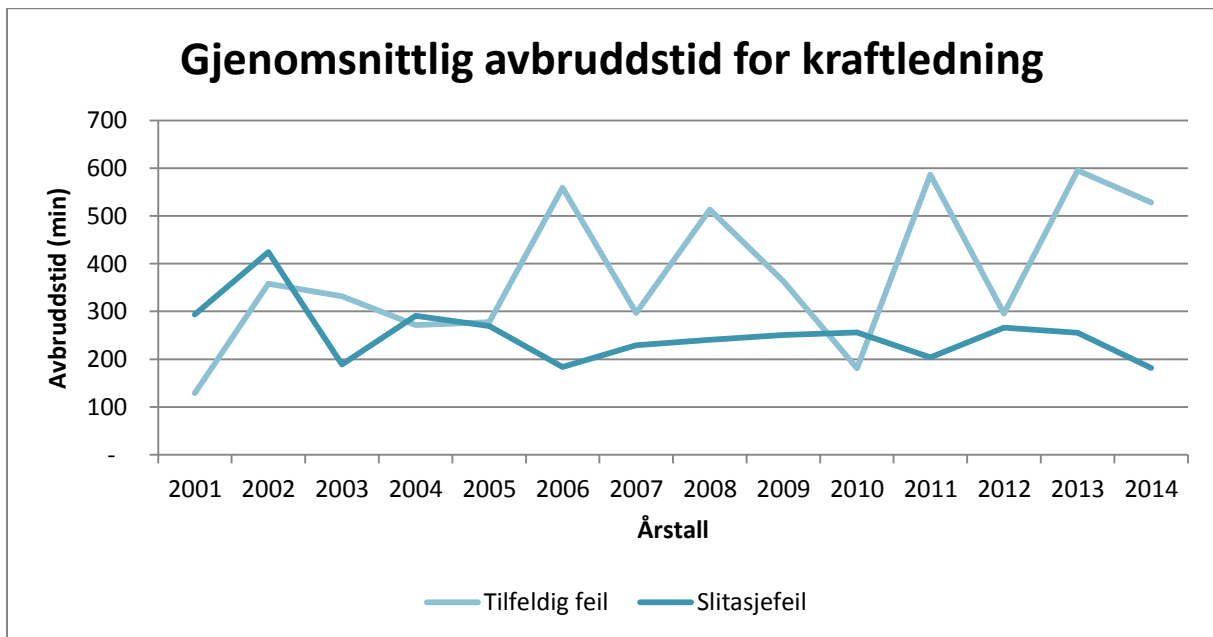
Figur 5-10, 5-11 og 5-12 fremstiller ulike sammensetninger for avbruddstid for kraftledningsfeil. Av figur 5-11 kan man særlig se toppene av tilfeldige feil for kraftledning i de årene hvor man har mye stormvær. Til sammenligning er avbruddstiden for andre anleggstyper i høyere grad konstant. Vi kan også se at slitasjefeilene for kraftledning har en lavere variasjon enn for de tilfeldige feilene.



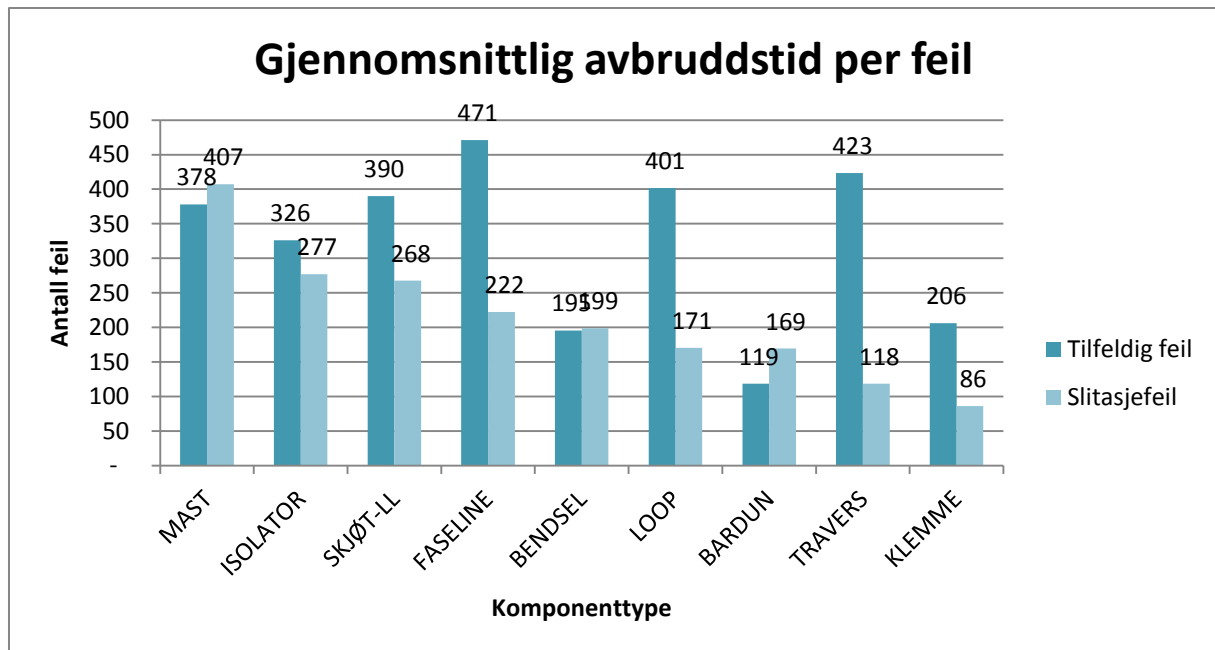
Figur 5-10: Gjennomsnittlig avbruddstid for slitasjerelaterte feil per år.



Figur 5-11: Gjennomsnittlig avbruddstid for tilfelige feil per år.

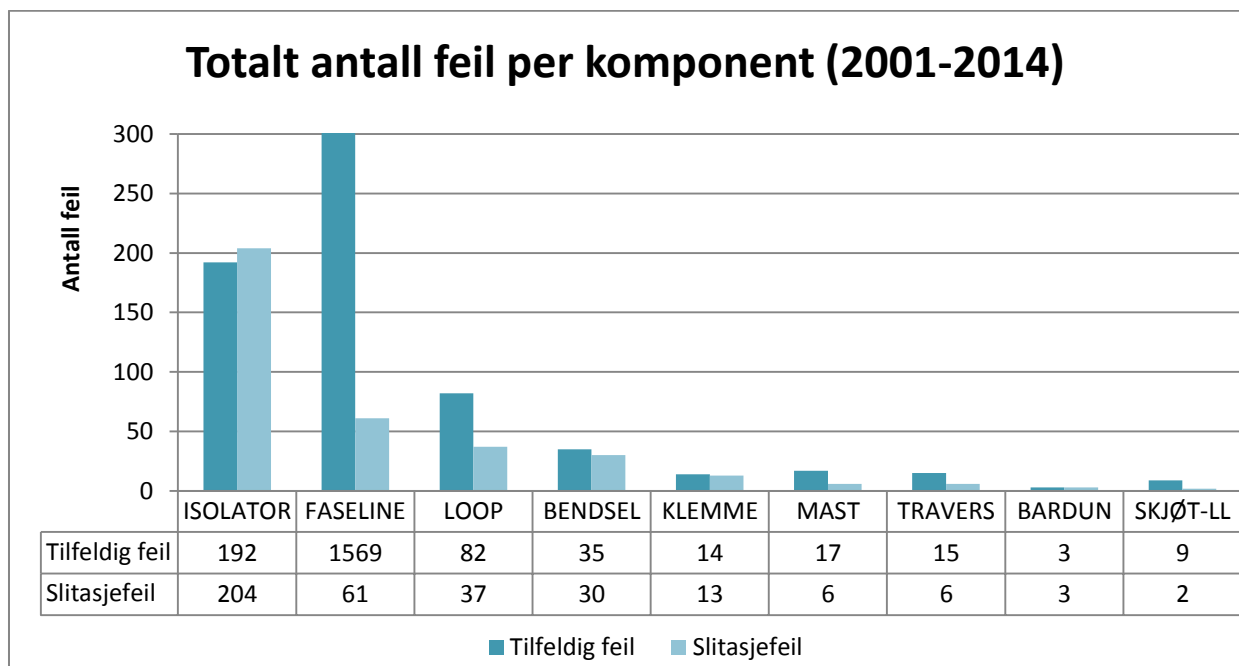


Figur 5-12: Gjennomsnittlig avbruddstid for kraftledning fordelt mellom slitasje og tilfelige feil, per år.



Figur 5-13: Gjennomsnittlig avbruddstid per feil for relevante komponenter..

Figur 5-13 fremstiller gjennomsnittlig avbruddstid for feil på ulike komponenter i et mastepunkt. Av figuren kan en se at for tilfeldige feil er det faseline som står den gjennomsnittlig høyeste avbruddstiden på 471 min. For slitasjerelaterte avbruddstider er det mast som står for den gjennomsnittlig høyeste avbruddstiden på 407 min.



Figur 5-14: Totalt antall feil per komponent fordelt på slitasjefeil og tilfeldige feil.

Figur 5-14 fremstiller totalt antall feil for kraftlednings-relevante komponenter fra 2001 til 2014 fordelt på slitasje og tilfeldige feil. Av figuren ser en at tilfeldige feil knyttet til faseline dominerer og havner utenfor skalaen med hele 1569. Flere grafer kan sees i vedlegg F.

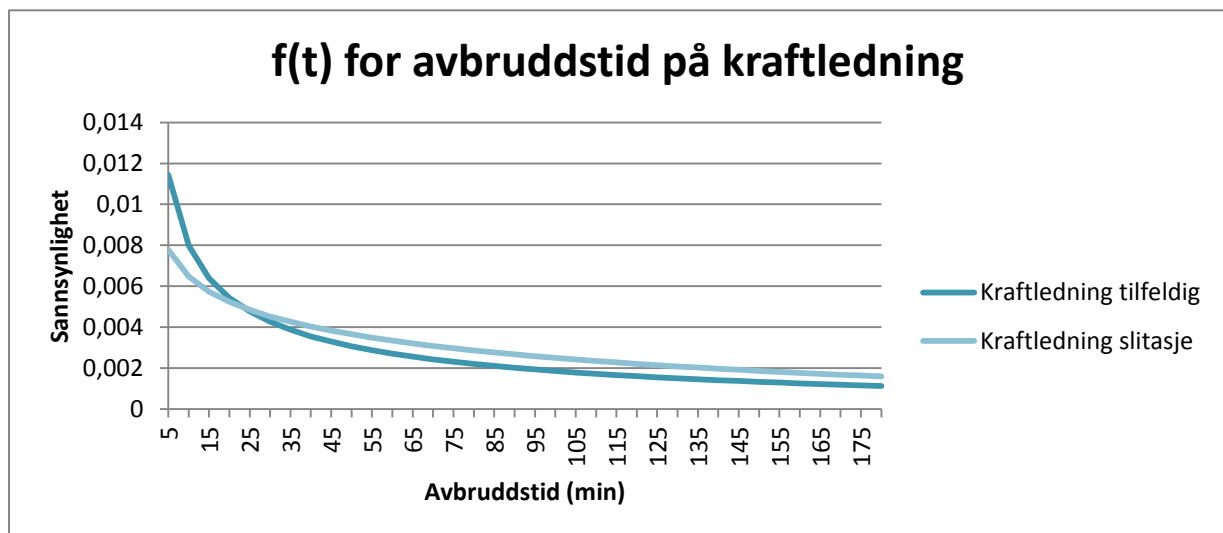
5.3 Nøkkeltall til avbruddstid

Avbruddsstatistikken fra FASIT-tabellen blir benyttet til å beregne forventet avbruddstid for feilene som inntreffer i kalkylen. Avbruddstidene sorteres på slitasje og tilfeldige feil.

Tabell 5-5: Avbruddstatistikk for kraftledning

| Kraftledning | |
|--|--|
| Tilfeldige feil | Slitasjefeil |
| Følgende nøkkeltall, oppgitt i minutter per avbrudd, for tilfeldige feil: <ul style="list-style-type: none"> • Korteste feil: 0 min • Lengste feil: 8 872 min • Gjennomsnitt: 399,12 min • Median: 205 min • Standardavvik: 683,83 min Dette gir følgende Weibull-parametere <ul style="list-style-type: none"> • Formparameter – m: 0,56 • Skaleringsparameter – θ: 240,32 | Følgende nøkkeltall gjelder for slitasjefeil: <ul style="list-style-type: none"> • Korteste feil: 0 min • Lengste feil: 4 051 min • Gjennomsnitt: 244,86 min • Median: 182 min • Standardavvik: 305,80 min Dette gir følgende Weibull-parametere <ul style="list-style-type: none"> • Formparameter – m: 0,79 • Skaleringsparameter – θ: 213,47 |

Vi ser av tabell 5-5 at gjennomsnittsverdi og standardavvik for tilfeldige feil på kraftledning er relativt høyt. Dette er sannsynligvis fordi slike feil inntreffer i høyt antall under stormvær. Et høyt antall feilsituasjoner som inntreffer samtidig vil føre til at ressursene blir strukket, og at feilrettingen for hver enkelt feil tar lang tid. For slitasjefeil er forventet avbruddstid betydelig kortere. Dette bygger opp under forrige argument, da disse feilene ikke er avhengige av tilfeldige og plutselige hendelser. Weibull-modellene for kraftledning kan sees i figur 5-15.



Figur 5-15: Weibull-modell av avbruddstid for kraftledning

Vi kan se at modellen gir svært høy sannsynlighet for korte avbrudd, med en hale mot de lengre avbruddene. Dette kommer av at modellen har formparameter mindre enn én. Det er derfor vanskelig å finne en middeltid til reparasjon (MTTR), da modellen er eksponentialfordelt.

5.4 Kostnader

I dette kapittelet gjennomgås de kostnader som er aktuelle for kalkylen. Disse kostnadene har hovedsakelig blitt innhentet fra RENS prosjektsystem, Statkraftalliansens fornyelsesvurderingsprosjekt, samt fra samtaler med veiledere ved AE Nett.

5.4.1 Feilrettingskostnader

Vi har valgt å se alle feilsituasjoner som generiske, hvor det kun er avbruddstiden som varierer. Kostnadene som er aktuelle er derfor komponentkostnader og mannskapskostnader. Komponentkostnadene beløper seg til 15 000 i vår kalkyle. Dette er omtrent kostnaden for ett mastepunkt i RENS kostnads katalog, og inkluderer maskinkostnader. Mannskapskostnadene beløper seg til 1000 kr/time med feilretting. Denne kostnaden er hentet fra fornyelsesvurderingsprosjektet til Statkraftalliansen.

5.4.2 KILE-kostnader

KILE-satsen for Skråstadvarden er beregnet til 41.500,- første time, og 500,- for resterende avbruddstid. Dette er fordi en feil på Skråstadvarden vil aktivere en effektbryter som kobler ut hele hovedlinjen Augland-Sødal. Disse kostnadene vil variere med hvilken linje som vurderes.

5.4.3 Befaring- og inspeksjonskostnader

Befarings- og inspeksjonskostnader er vedlikeholdskostnader som relaterer seg til inspisering av anlegg. I vår kalkyle har vi valgt å begrense disse kostnadene til befaring og inspeksjon. Kostnadsstandardene er hentet fra Statkraftalliansens fornyelsesvurderingsprosjekt og RENS prosjektsystem. Befaringskostnadene er oppgitt til 2600 kr/km av Statkraftalliansen og 2580 kr/km av REN. Inspeksjonskostnadene er oppgitt til 1300 kr/km av Statkraftalliansen og 1290 kr/km av REN.

5.4.4 Investeringskostnader

Investeringskostnadene er avhengige av den spesifikke linjen. Aspekter som påvirker dette er dimensjonering, terrengprofil, materialvalg, om området er beferdet eller ikke etc. For Skråstadvarden gir RENS kostnads katalog en kilometerpris på 700 000 kr for en BLL-linje, med kompositisolatorer, aluminiums-traverser og kreosotimpregnerte stolper. Avgreningen Skråstadvarden ligger i meget ulendt terreng, og man kan anta at det må benyttes helikopter til montering. I samråd med AE Nett ble kostnadene for ny linje satt til 1,35 millioner.

5.4.5 Tapskostnader

Tapskostnader er kostnader for ohmske tap i linjen. Dette er en kostnad som er avhengig av belastningen på linjen og hvilken resistans lederen har. Normalt beregnes slike kostnader ut fra lastflytanalyser. For linje Skråstadvarden har nominell belastning blitt beregnet til 0,2 Ampere, og resistansen har blitt beregnet til 2,6 Ohm. Dette gir et årlig energitap på i underkant av 1000 kWh. Energisatsen settes til 0,5 kr/kWh.

5.4.6 Diskonteringsrente

For å beregne netto nåverdien av kostnadene er det nødvendig å diskontere investeringen med en rentesats. I vår kalkyle har vi valgt å sette denne satsen til 6,56 % [38], som tilsvare referanserenten til NVE. Dette er et mål på referanseavkastning for nettselskapene basert på beregninger utført av NVE. Denne renten varierer fra år til år og avhenger blant annet av skattesats, inflasjon, swaprente, kredittrisikopremie mm.

5.5 Levetidsdata

Datagrunnlaget for levetidsmodellene til de ulike komponentene ble innhentet via et spørreskjema som ble sendt ut til ulike eksperter i nettbransjen. Av 32 kontaktede personer ble det mottatt svar fra seks, i tillegg til anslagene fra Terje Taraldsen og Syvert Augland. Dette datagrunnlaget er tynt, men formålet er kun å danne levetidsmodeller som kan demonstrere oppgaveløsningen. En grundigere undersøkelse av datagrunnlag for levetidsmodellene behøves om verdiene skal bli pålitelige.

Det ble etterspurt forventet minimum, maksimum og normal levetid for følgende komponenter:

Line

- Kobber (Cu)
- Stål/aluminium (FeAl/Al)
- Stål (Fe)
- Belagt line (BLX)
- Belagt line (BLL)

Isolator

- Porselen (pigg)
- Kompositt
- Glass (kjede)
- Opphengutstyr og bolter
- Bendsel

Travers

- Stål
- Kreosotimpregnert
- Aluminium
- Klaver og bolter

Stolpe

- Kreosotimpregnert
- Saltimpregnert
- Barduner
- Stag og bolter

Det ble besluttet at enkelte av komponentene ikke skulle inkluderes i beregningene, da dette viste seg å være komplisert. Dette gjelder stag og bolter, barduner, klaver og bolter, bendsel, opphengutstyr og bolter.

Svarverdiene finnes i vedlegg D.

Kapittel 6: Presentasjon av løsning

I dette kapitlet gjennomgås løsningen på problemstillingene i oppgaven. Her beskrives disse til dels i detalj, sammen med metoder og brukerguider. Formålet er å beskrive hvordan AE Nett kan benytte disse for fornyelsesvurdering og vedlikeholdsplanlegging. Rammeverket for løsningen ble beskrevet i kapittel 2, og metodene og teorien ble presentert i kapittel 4.

6.1 Sviktmekanismer og sviktintensitet

For å kunne utnytte anleggene i høyest mulig grad er det viktig med gode vedlikeholds- og beredskapsrutiner, og bakgrunnsdata som kan støtte opp om disse. En viktig del av slike systemer er en klar forståelse over hvilke feilingsmekanismer som kan oppstå, og sannsynligheten for at disse kan inntreffe. Det blir da lettere å planlegge et optimalt vedlikeholdssystem, og man kan enklere beregne nødvendig kapitalbinding i form av lager. Dette er ikke en direkte del av fornyelsesvurderingsprosessen, men er vesentlig for å kunne oppnå lengre levetid på nettanlegg uten for høye avbruddstider.

6.1.1 Kategorisering av sviktmekanismer

En viktig del av vedlikeholdsmentaliteten er skillet mellom tilfeldige og slitasjerelaterte feil. Tilfeldige feil oppstår på grunn av uforutsigbare, «plutselige» hendelser som påvirker enheten som feiler. Dette kan for eksempel være lynnedslag, trefall, eller hærverk som fører til feil på en enhet. Da disse feilene er tilfeldige vil de ikke være en funksjon av tid, og sviktintensiteten vil være konstant. Som en følge av dette vil det være umulig å vedlikeholde seg ut av slike situasjoner, og vedlikeholdet vil være bortkastet. Man må istedenfor etablere barrierer eller redundanssystemer som risikoreduserende tiltak for å prøve og hindre situasjonene.

Slitasjerelaterte feil er ikke tilfeldige. Dette er feil som er en funksjon av tid, og som en følge av dette vil opptre konsentrert. Det er dermed til en viss grad mulig å forutsi når en enhet vil feile som følge av slitasje. Ved å sette en grense for enhetens tilstand kan man kontrollere tilstanden og vedlikeholde seg ut av en potensiell feilsituasjon. I disse situasjonene vil derfor vedlikehold være effektivt, og man kan forlenge enhetens levetid ved å utføre riktige vedlikeholdstiltak. Om man skiller på de ulike feilsituasjonene vil man derfor lettere kunne optimere vedlikeholdsplanen.

For å kunne skille på de ulike feilsituasjonene er det viktig å være bevisst på hva som kan oppstå, og viktige momenter om feilsituasjonen, slik som enheten som feiler, hvordan feilen blir oppdaget, påvirkning på systemet som enheten er en del av etc. Et viktig verktøy i denne sammenheng vil være FMECA. I forbindelse med denne oppgaven ble en kortfattet FMECA demonstrert på en enhet for å vise prinsippet. Resultatene kan sees i vedlegg G. Utover dette ble aktuelle feilmekanismer og -årsaker for høyspent luftnett identifisert i samarbeid med AE Nett. Resultatene fra dette kan sees i vedlegg H.

6.1.2 Sviktintensitet

Sviktintensitet er forventet antall feil for en enhet i løpet av et gitt tidsrom. Et estimat for sviktintensitet kan beregnes slik [4-44]:

$$\hat{\lambda} = \frac{\text{antall feil}}{\text{akkumulert driftstid for enhetstypen}} = \frac{n}{\tau}$$

Ved å multiplisere sviktintensiteten med et tidsintervall vil vi få sviktsannsynligheten i løpet av det gitte tidsintervallet, gitt at enheten har overlevd opp til tiden t [4-22]:

$$\lambda(t) * \Delta t = P(t \leq T < t + \Delta t | T \geq t)$$

Det har blitt utarbeidet sviktintensitetsestimater for de ulike feilmekanismene for de aktuelle komponentene. Resultatene kan sees i vedlegg I. For denne beregningen antas alle feilmekanismer å være konstant. Dette er imidlertid en tilnærming, da vi vet at sviktintensiteten for slitasjefeil er en funksjon av tid.

Det er viktig å påpeke at datagrunnlaget for disse feilene ikke er optimalt. Blant annet har vi måttet foreta tilnærminger til antallet av de ulike enhetene, da det kun er antall mastepunkt og antall kilometer linje som er oppgitt. Det har også blitt foretatt en tilnærming ved at vi forventer konstant antall enheter i nettet fra 2001 og frem til og med 2014 for å kunne beregne sviktintensitetsestimater, da den akkumulerte driftstiden, τ , for hver enhetstype er analyseperiodens lengde multiplisert med antall operative enheter i analyseperioden.

6.1.3 Sviktdatabase

Ved å samle inn mer sviktdata for komponentene i nettet vil man kunne oppnå et bedre datagrunnlag for beregning av sviktsannsynligheter og valg av vedlikeholdstiltak. Det anbefales derfor at anbefalingene til OREDA blir fulgt slik at datagrunnlaget blir bredt nok. Dataene som må samles inn er beskrevet i kapittel 4.10.

Det er også viktig at data for slitasjefeil samles inn. Det vil være av betydning at driftstid for de ulike komponentene som feiler som følge av slitasje samles inn for å kunne korrigere levetidsmodellene som angir teknisk levetid. For slitasjefeilene er ikke sviktintensiteten konstant – denne beregnes fra sannsynlighetsfordelingene – og det er derfor viktig at levetidsmodellene er oppdaterte.

Det er også viktig at en god database for enhetsidentifikasjon etableres. Det blir da lettere å knytte sviktintensiteter opp mot komponenttyper, fabrikant, plassering etc. Dette vil danne et bedre grunnlag for å kunne forlenge anleggenes levetid.

6.1.4 Beredskapslager

Da sviktmekanismene kan deles opp i tilfeldige- og slitasjerelaterte feil er det også hensiktsmessig å basere beredskapslageret på denne oppdelingen. Rasjonale er at slitasjerelaterte feil til en viss grad kan forutsies da man har en modell for hvordan påliteligheten utvikler seg. På den annen side vil det være nødvendig med en lagerbeholdning for å sikre seg mot tilfeldige feil.

Sviktintensiteten for tilfeldige feil er konstant da disse feilene ikke kan forutsies. For lagerberegning vil man derfor sette en beskyttelsesgrense, P_L , for at man skal ha nok enheter på lager til enhver tid. Det er ulønnsomt å binde opp kapital på lagerbeholdning, da kapitalen kunne vært investert i

avkastningsgivende aktiva. Det er derfor ønskelig at lagerbeholdningen holdes på det nivået som gir ønsket beskyttelsesgrad ved feilsituasjoner, men ikke høyere.

Prosedyren for å beregne nødvendig beredskapslagerstørrelse for en komponent er gjennomgått i kapittel 4.8.1 og kan kort oppsummeres slik:

- 1) Bestem sviktintensitet, λ , og total sviktintensitet for enhetstypen, $\lambda_T = \lambda * N$
- 2) Bestem reparasjonstid, t
- 3) Bestem ønsket beskyttelses sannsynlighet, P_L
- 4) Beregne antall lagerenheter, N_S , som gir Poisson-rekken med ønsket beskyttelses sannsynlighet [4-41]

$$P(n \leq N_S) = \sum_{n=0}^{n=N_S} \frac{(\lambda t)^n}{n!} e^{-\lambda t} \geq P_L$$

Antall enheter, n , vil da være et slikt antall at sannsynligheten for å ha nok enheter på lager vil være lik eller høyere enn ønsket beskyttelsesgrad, P_L . Det har blitt foretatt en beregning av beredskapslagerstørrelse for AE Nett som et eksempel. Beregningen for eksempelet kan sees i vedlegg J.

Resultatet ble 8 kilometer line, 1 stolpe, 2 isolatorer og 0 traverser. Dette er gitt ved en reparasjonstid (bestillingstid for nye komponenter) på 14 dager. Det ble antatt at alle komponenter var henholdsvis av typen BLL, saltimpregnert stolpe, komposittisolator og tre-travers, da disse har kortest antatt teknisk levetid (vedlegg P). Verdiene er urealistiske lave. Dette kan sannsynligvis være måten feil blir registrert på; ved en feilsituasjon er det kun forårsakende komponent som blir registrert, ikke alle komponenter som blir ødelagt. Det kan også være at bestillingstiden antas for lav.

6.1.5 Optimalt utskiftningsintervall

Slitasjerelaterte feil kan i høyere grad forutsies da de har en tydelig konsentrasjon om et punkt i komponentens levetid. Det er derfor ikke hensiktsmessig å bygge opp et lager av disse enhetene da man heller kan sette et utskiftningsintervall og bestille opp enhetene etter hvert som utskiftningsstiden nærmer seg. Optimalisering av kapitalbindingen vil i dette tilfellet involvere Lean-tankegang og Just In Time (JIT)-kriterier, hvor enheten blir levert først når den skal benyttes.

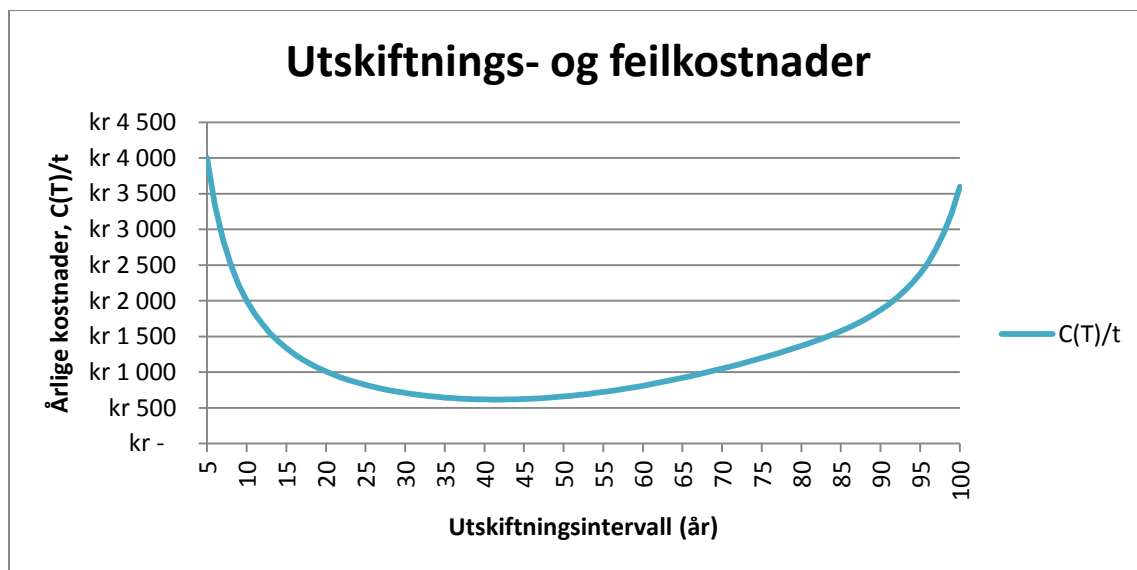
For å beregne optimalt utskiftningsstidspunkt for en slitasjeutsatt enhet kan man benytte følgende formel [4-37]:

$$T_0 = \theta \left(\frac{C_p}{(m-1)C_f} \right)^{\frac{1}{m}}$$

Man setter da form-, m , og skaleringsparameteren, θ , for den aktuelle komponenten, og bestemmer kostnad for feil, C_f , og kostnad for preventiv utskiftning, C_p . Resultatet vil bli det utskiftningsstidspunktet som balanserer feilkostnader og utskiftningskostnader på et lavest mulig nivå.

Som et eksempel kan utskiftningsintervallet for en kreosotimpregnert stolpe settes. Denne har en Weibull-modell med formparameter lik 4,65 og skaleringsparameter lik 73,83. Hvis vi velger en preventiv utskiftningskostnad, C_p , lik 20.000,- og en feilutbedringskostnad, C_f , på 100.000,-, vil

optimalt utskiftningsintervall være ca. 40 år. Se figur 6-1. Dette vil naturligvis variere med kostnadene knyttet til feil på den spesifikke linjen, og hvilken komponent det er snakk om.



Figur 6-1: Utskiftnings- og feilkostnader per tidsenhet for en stolpe, ved ulike utskiftningsintervall

6.2 Risikoakseptkriterier

6.2.1 Tilstandskarakterer

Risikoakseptkriteriene setter grenser for hvor høy risiko som kan tolereres. Dette kan blant annet knyttes opp mot valg av grenser for de ulike tilstandskarakterene. Hver tilstandskarakter har sitt eget pålitelighetsintervall. Disse grensene er som følger:

- Karakter 1: 1,00-0,99
- Karakter 2: 0,95-0,98
- Karakter 3: 0,80-0,94
- Karakter 4: 0,60-0,79
- Karakter 5: 0,00-0,59

Påliteligheten gjelder for de neste fem årene, da en tilstandsbefaring normalt gjennomføres hvert femte år. Grensene har blitt satt i samråd med AE Nett. Disse har ikke blitt testet og det er derfor hensiktsmessig at pålitelighetsgrensene oppdateres når mer data foreligger, og det er mulighet for å teste effekten av grensene. Påliteligheten er knyttet opp mot komponentens levetidsmodell som beskriver hvilken alder som fører til hvilken pålitelighet, basert på feilingssannsynligheten ved den spesifikke alderen. Det har i samarbeid med veiledere fra AE Nett blitt utarbeidet en veiledning til tilstandskarakterene som knytter påliteligheten opp mot tilstanden på komponenten. Tilstandskarakterene baserer seg også delvis på SYSLIFE-prosjektet i regi av Energi Norge [7]. Som nevnt bør kriteriene for de ulike karakterene gjennomgås for å oppnå bedre pålitelighet. Kriteriene for de ulike karakterene og komponentene kan sees i vedlegg B. Et eksempel på en tilstandskaraktertabell kan sees i tabell 6-1.

Tabell 6-1: Eksempel på karaktersetting for en komposittisulator

| Isolator - Kompositt | | | |
|----------------------|-----------------------------|------------------|-------------------|
| Alder | Sviktintensitet - λ | Pålitelighet - R | Tilstandskarakter |
| 0 | 0,00 | 100 % | 1 |
| 5 | 0,00 | 100 % | 1 |
| 10 | 0,00 | 100 % | 1 |
| 15 | 0,00 | 100 % | 1 |
| 20 | 0,00 | 100 % | 1 |
| 25 | 0,00 | 99 % | 2 |
| 30 | 0,01 | 97 % | 2 |
| 35 | 0,01 | 92 % | 3 |
| 40 | 0,03 | 83 % | 3 |
| 45 | 0,04 | 70 % | 4 |
| 50 | 0,07 | 53 % | 5 |
| 55 | 0,11 | 33 % | 5 |
| 60 | 0,17 | 16 % | 5 |
| 65 | 0,25 | 6 % | 5 |
| 70 | 0,35 | 1 % | 5 |

6.2.2 Andre risikogrenser

Det må dannes et bilde av hvilken risikograd selskapet kan tolerere. For kvalitative risikokategorier som HMS, omdømme etc. er det ofte vanskelig å tallfeste risikoen, og tilsvarende vanskelig å utarbeide risikoakseptkriterier. Grensene for slike risikoakseptkriterier vurderes ikke i denne oppgaven, disse må eventuelt settes av selskapet selv.

6.3 Utvikling av levetidsmodeller

Levetidsmodellene for de ulike komponentene gir sannsynlighetsfordelingen for feil basert på hvor gammel komponenten er. Disse modellene kan ha et utall ulike parametere, med den hensikt å oppnå en mest mulig korrekt modellering av den virkelige verden.

6.3.1 Begrensninger og avveininger

For å lage en pålitelig levetidsmodell er det nødvendig med data om alderen på komponentene i det tidspunktet de feiler, eller når en tilstand som er utilfredsstillende. Videre kan modellen utvides med ulike parametere, slik som jordforhold, saltinnhold i luft, luftfuktighet, lufttemperatur etc. Det er imidlertid manglende data i feilstatistikken som er tilgjengelig for oppgaven. Denne statistikken oppgir tidspunkt for feil, stasjon og avgang feilen befinner seg på, hvilken komponent som feiler, og hva som er feilårsak. Det finnes ingen opplysninger om alderen til komponenten.

Det er utenfor denne oppgavens fokus å lage detaljerte levetidsmodeller for hver enkelt komponent i distribusjonsnettet til AE Nett. Dette, sammen med manglende data, fører til noen avveininger:

- Det er utarbeidet levetidsmodeller for et begrenset antall komponenter. (se vedlegg P)
- Det er utarbeidet levetidsmodeller kun for de vanligste komponenttypene. (se vedlegg P)
- Levetidsmodellenes pålitelighet er ikke testet. Det vil si at vi ikke kan garantere for at tid til svikt er riktig.
- Levetidsmodellene er ikke knyttet til AE Netts feilstatistikk. De er basert på tilbakemeldinger fra eksperter.
- Levetidsmodellene tar ikke hensyn til miljøforhold som avstand til kyst, bunnforhold, etc. Modellene blir dog justert ved informasjon om oppdatert tilstand.
- Metoden for å anslå parameterne til Weibull-fordelingene er en tilnærming.

Det anbefales at disse punktene i fremtiden undersøkes i større detalj, slik at modellene som benyttes i tilstandsvurderingsprosessen kan få en høyere detaljeringsgrad og gi mer gyldige beslutningsgrunnlag. Det vesentlige i oppgaven er rammeverket som konstrueres for å kunne fornyelsesvurdere høyspente luftlinjer i distribusjonsnettet. En del av våre anbefalinger vil derfor være å utvide blant annet levetidsmodellene med mer nøyaktig og mer omfattende datagrunnlag, for å kunne foreta bedre beslutninger. Det kreves andre metoder i tilfelle slike data skal benyttes, blant annet fordi enkelte av komponentene ikke har blitt benyttet så lenge at de har nådd forventet teknisk levetid. Slike metoder blir ikke presentert i denne rapporten.

6.3.2 Prosedyre for å anslå levetid for nettkomponenter

Metodene som brukes for å estimere Weibull-parameterne i denne oppgaven er ikke ideelle. Vi har svært få datapunkter for levetid, og et bedre datasett vil kunne gi bedre modeller. Ideelt sett bør et omfattende datasett benyttes, og man bør velge den fordelingsfunksjonen som passer best med datasettet. I denne oppgaven har vi valgt å anta at levetiden er Weibull-fordelt, men det er ikke gitt at dette er riktig. Det er likevel en begrunnet antakelse, da denne fordelingen er mye brukt i problemstillinger knyttet til levetid av komponenter.

Prosedyre for å finne m- og θ -parameterne er som følger:

- 1) Samle inn feilstatistikk. Det som er interessant er driftstid fra installasjon til feil:

$$\{t_1, t_2, \dots, t_N\}$$

- 2) Finn gjennomsnittsverdien, μ , for tid til feil:

$$\hat{\mu} = \frac{t_1 + t_2 + \dots + t_N}{N} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i \quad [6-1]$$

- 3) Finn standardavviket:

$$\hat{\sigma} = \sqrt{\frac{(t_1 - \mu)^2 + (t_2 - \mu)^2 + \dots + (t_N - \mu)^2}{N}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (t_i - \mu)^2} \quad [6-2]$$

- 4) Estimer variasjonskoeffisienten [4-53]:

$$\hat{c} = \frac{\hat{\sigma}}{\hat{\mu}}$$

- 5) Estimer m-parameteren [4-54]:

$$m = \frac{1}{\hat{c}^{1.08}}$$

- 6) Estimer θ -parameteren [4-55]:

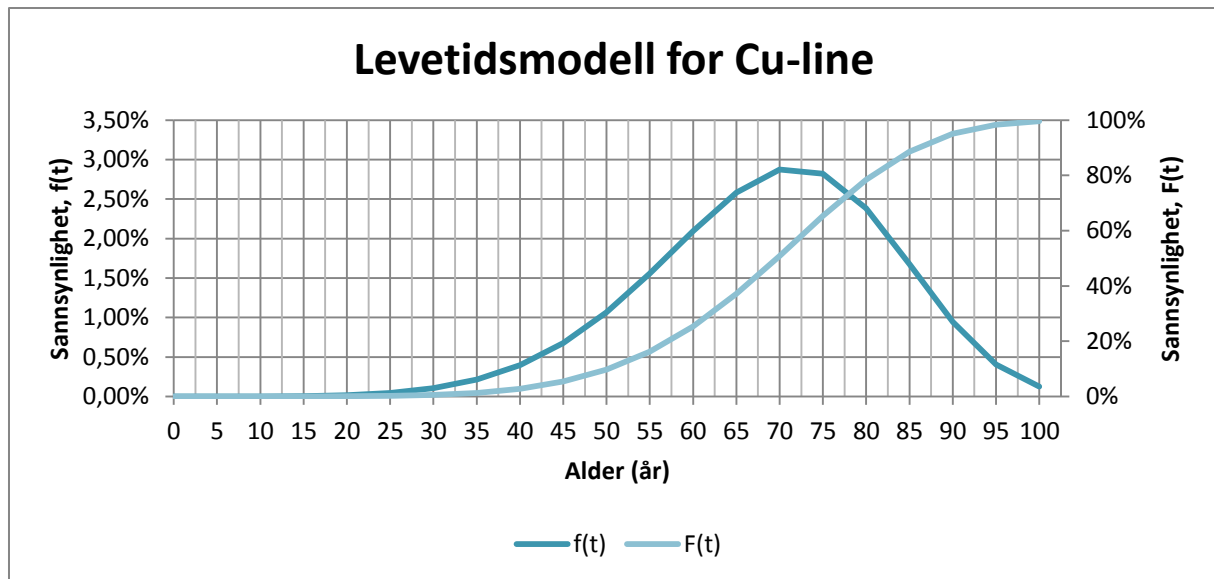
$$\theta = \frac{\hat{\mu}}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{m}\right)}$$

- 7) Utarbeid Weibull-funksjonen [4-17]:

$$f(t) = \frac{m}{\theta} \left(\frac{t}{\theta}\right)^{m-1} e^{-\left(\frac{t}{\theta}\right)^m}$$

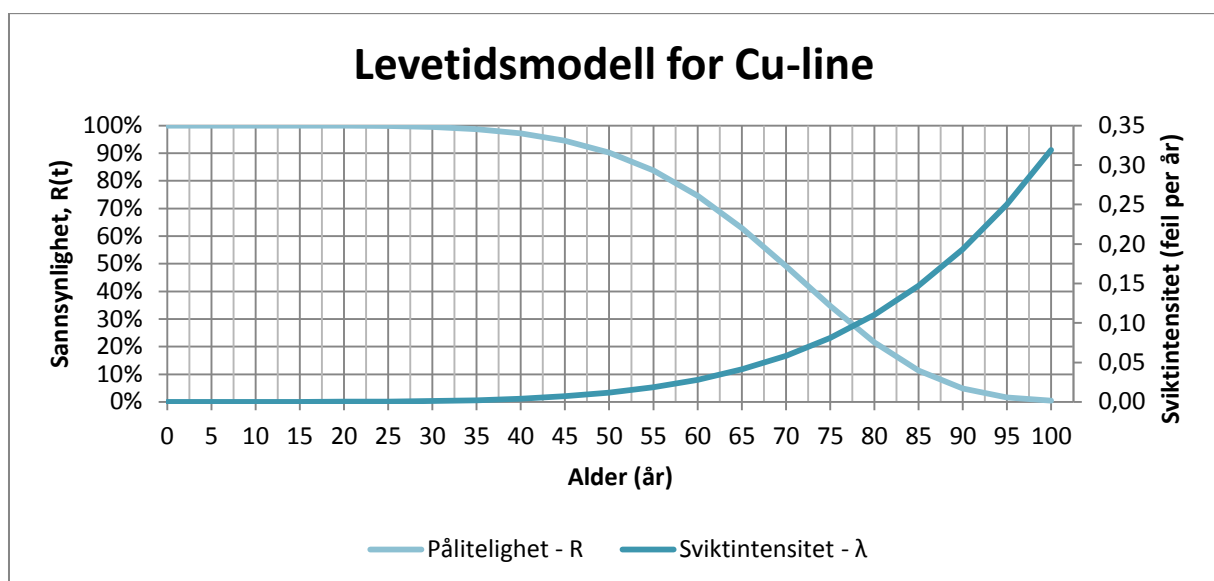
Denne funksjonen danner grunnlaget for levetidsmodellene, og den tilhørende påliteligheten. Samme metode benyttes for å modellere avbruddstidene.

Figur 6-2 fremstiller fordelingsfunksjonen, $f(t)$, og den kumulative fordelingsfunksjonen, $F(t)$, til en kobberline. Den kumulative fordelingsfunksjonen angir sannsynlighet for feil innen tiden t , og vil således bli større ved økende alder. Fordelingsfunksjon angir fordeling av sannsynligheter for feil langs tidsaksen. Flere levetidsmodeller finnes i vedlegg P.



Figur 6-2: Plotting av fordelingsfunksjon og kumulativ fordelingsfunksjon

Figur 6-3 viser et eksempel på estimering av en levetidsmodell for en kobberline. Påliteligheten, $R(t)$, er avtakende ved økende alder, da sannsynligheten for slitasjefeil øker. Sviktintensiteten, $\lambda(t)$, øker tilsvarende med tiden, da høyere feilsannsynlighet fører til flere forventede feil.



Figur 6-3: Plotting av sviktintensitetsfunksjon og pålitelighetsfunksjon

6.3.3 Oppdatert levetidsmodell

Det kan bli nødvendig å oppdatere levetidsmodellen etter at tilstanden er avdekket. Dette fordi ulik slitasje kan føre til at en spesifikk enhet avviker fra den opprinnelige levetidsmodellen. For å oppdatere levetidsmodellen benyttes tilstandskarakteren som blir gitt til enheten på befaringen. Denne tilstandskarakteren er knyttet til en pålitelighet, R , som anslår sannsynligheten for at det ikke oppstår slitasjefeil på enheten i løpet av tidsrommet $[T, T + \Delta t]$. Har enheten som analyseres opplevd mindre slitasje enn normalt vil påliteligheten være høyere enn for den opprinnelige modellen, og motsatt hvis enheten har opplevd mer slitasje.

Det er altså den avdekte påliteligheten vi ønsker å benytte. For å oppdatere vår modell benytter vi da følgende sammenheng [4-60]:

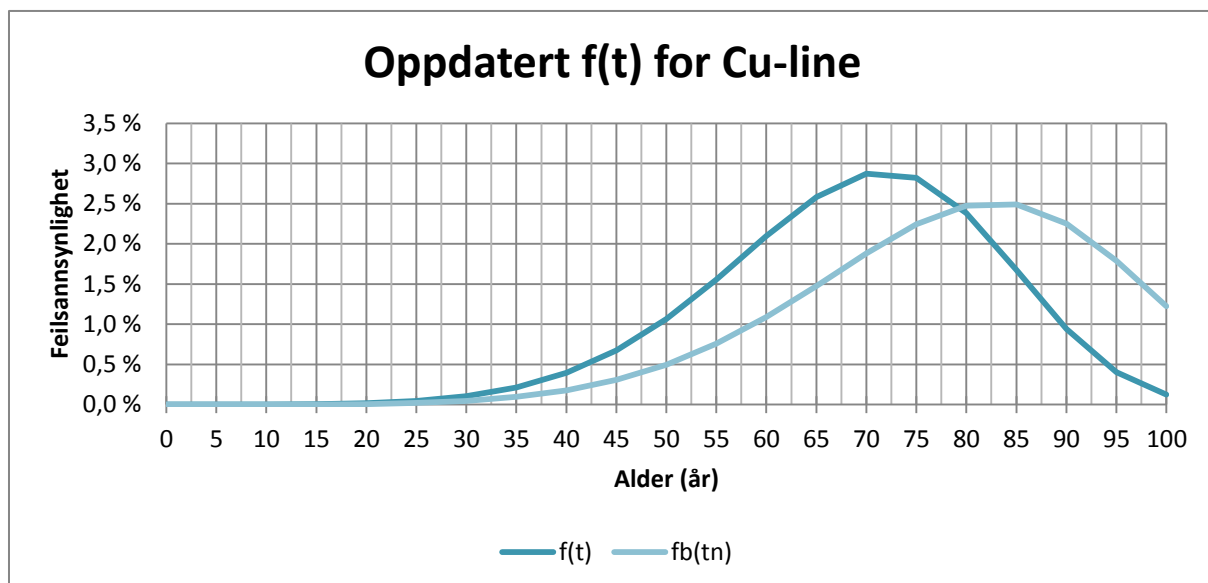
$$R(T + \Delta t) = e^{-\left(\frac{T+\Delta t}{\theta}\right)^m}$$

Påliteligheten, R , og tiden, $T + \Delta t$, er kjent. Skaleringsparameteren, θ , kan da oppdateres med den nye informasjonen, slik at vi oppnår en modell som reflekterer den endrede slitasjen [4-61]:

$$\theta = \frac{T + \Delta t}{\sqrt[m]{-\ln R(T + \Delta t)}}$$

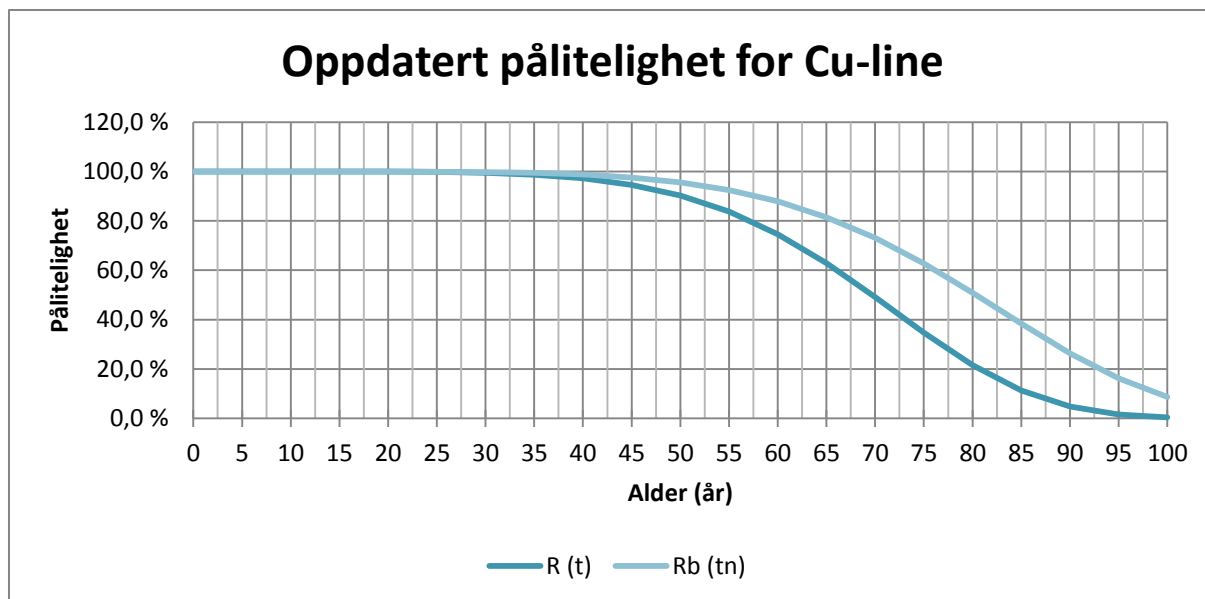
Weibull-modellen vil så forskyves mot høyre hvis enheten har opplevd mindre slitasje enn normalt, eller mot venstre dersom slitasjen er høyere enn normalt. Det ble valgt å ikke forsøke å endre formparameteren, m , da dette ble ansett som for ressurs- og tidkrevende.

Et eksempel på sammenligning mellom opprinnelig og oppdatert levetidsmodell kan sees i figur 6-4. Det ble her avdekket at enheten hadde tilstandskarakter 3 ved 61 år, mot antatt karakter 4.



Figur 6-4: Opprinnelig og oppdatert fordelingsfunksjon for en Cu-line med tilstandskarakter 3 ved 61 år

Her vil fordelingsfunksjonen flytte seg mot høyre langs tidsaksen, da vi forventer at linjen vil vare lengre enn det som ble forutsatt opprinnelig. For eksempel vil sannsynligheten for feil være ca. 1 % ved 50 år for den opprinnelige modellen. Denne sannsynligheten reduseres til 0,5 % for den oppdaterte modellen. Levetiden er fortsatt en stokastisk variabel, noe som betyr at det ikke er gitt at linjen vil oppnå høyere alder, men at det er mer sannsynlig.



Figur 6-5: Opprinnelig og oppdatert pålitelighet for en Cu-line med tilstandskarakter 3 ved 61 år

Ved oppdatering av modellen etter 61 år ser vi at også påliteligheten endrer seg, og opprettholder en høyere verdi over tid sammenlignet med opprinnelig pålitelighet. Dette er fordi vi forventet at linjen hadde dårligere tilstand enn det som ble avdekket.

Forskyvning av feilsannsynligheten fremover i tid vil være gunstig når vi beregner netto nåverdien, da et beløp i fremtiden vil ha lavere verdi enn i dag. Dette er fordi det fremtidige beløpet diskonteres med en høyere brøk. Se kapittel 4.11.3.

Tabell 6-2 viser bakgrunnsdataene for grafene. Hvis vi sammenligner med tilstandskarakterene ser vi at den avdekte tilstanden vil tilsa at enheten holder seg bedre enn den opprinnelige modellen.

Tabell 6-2: Tabell som viser opprinnelig og oppdatert data for en Cu-line med tilstandskarakter 3 ved 61 år

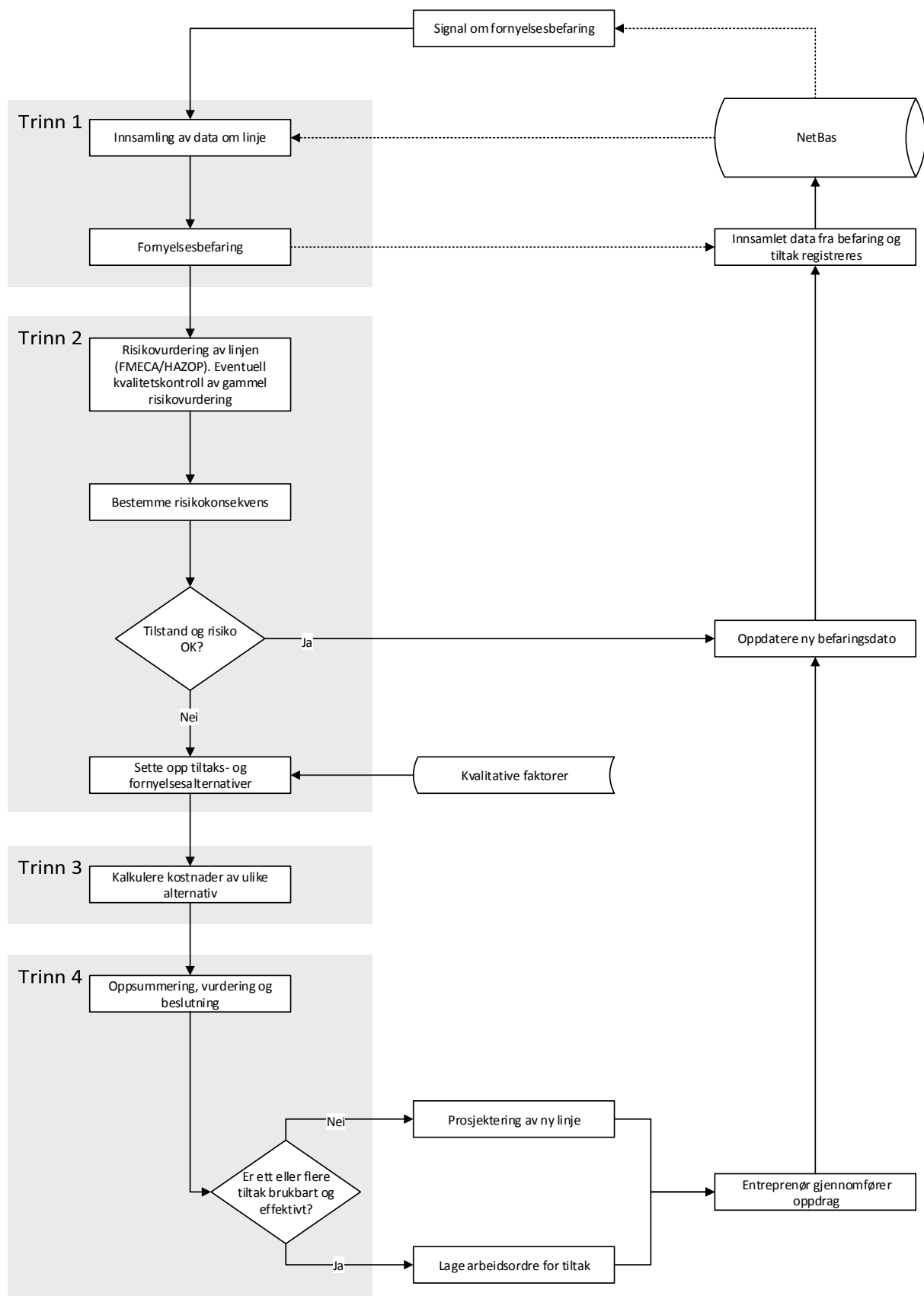
| Linje - CU | | | | | | | |
|------------|--------------|---------------|---------------|--------------|--------------|----------|----------|
| Alder | $\lambda(t)$ | R(t) | $R_b(t_n)$ | f(t) | $f_b(t_n)$ | Antatt | Virkelig |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| 30 | 0,00 | 99,5 % | 99,8 % | 0,1 % | 0,0 % | 1 | 1 |
| 35 | 0,00 | 98,7 % | 99,4 % | 0,2 % | 0,1 % | 2 | 1 |
| 40 | 0,00 | 97,2 % | 98,8 % | 0,4 % | 0,2 % | 2 | 2 |
| 45 | 0,01 | 94,6 % | 97,6 % | 0,7 % | 0,3 % | 3 | 2 |
| 50 | 0,01 | 90,3 % | 95,6 % | 1,1 % | 0,5 % | 3 | 2 |
| 55 | 0,02 | 83,8 % | 92,5 % | 1,6 % | 0,8 % | 3 | 3 |
| 60 | 0,03 | 74,6 % | 87,9 % | 2,1 % | 1,1 % | 4 | 3 |
| 65 | 0,04 | 62,9 % | 81,5 % | 2,6 % | 1,5 % | 4 | 3 |
| 70 | 0,06 | 49,1 % | 73,1 % | 2,9 % | 1,9 % | 5 | 4 |
| 75 | 0,08 | 34,7 % | 62,8 % | 2,8 % | 2,2 % | 5 | 4 |
| 80 | 0,11 | 21,6 % | 50,9 % | 2,4 % | 2,5 % | 5 | 4 |
| 85 | 0,15 | 11,4 % | 38,4 % | 1,7 % | 2,5 % | 5 | 5 |
| 90 | 0,19 | 4,9 % | 26,4 % | 0,9 % | 2,2 % | 5 | 5 |
| 95 | 0,25 | 1,6 % | 16,3 % | 0,4 % | 1,8 % | 5 | 5 |
| 100 | 0,32 | 0,4 % | 8,7 % | 0,1 % | 1,2 % | 5 | 5 |

6.4 Fornyelsesvurderingsprosessen

Hovedkonstruksjonen i oppgaven er selve fornyelsesvurderingsprosessen og rammeverket rundt denne. Det er den systematiske tankegangen og fokuset på risiko og usikkerheter som er viktig for at beslutningsgrunnlaget skal bli så godt som mulig. For at dette skal oppnås har vi valgt å ta utgangspunkt i RCM-prosessen. RCM-prosessen består av tre delprosesser: trinn 0, bruke risikoverktøy for å kartlegge feilmodi; trinn 1, undersøke og avgjøre konsekvensen av feilmodiene; trinn 2, undersøke hvilket tiltak som er brukbart og effektivt.

Fornyelsesvurderingsprosessen er en kontinuerlig prosess som består av fire hovedtrinn. Se figur 6-6. Til sammenligning kan AE Nett sin tidligere fornyelsesprosess sees i vedlegg N, sammen med førsteutkast og revidert prosess. Nedenfor er en forenklet beskrivelse av prosessen:

- 1) Fornyelsesvurderingsprosessen starter med at det oppdages et behov (triggerkriterium) for fornyelsesvurdering av en gitt linje, og det sendes et signal om at det må foretas en fornyelsesbefaring.
- 2) Det innhentes informasjon om den aktuelle linjen, slik at befarende blant annet kan gjøre seg kjent med linjen og området rundt.
- 3) Deretter gjennomføres det en tilstandskontroll, hvor informasjon om tilstanden til de ulike komponentene i et mastepunkt vurderes. Den dårligste komponenten gjenspeiler den totale tilstandskarakteren dersom det finnes flere av en komponenttype. Når linjen er befart foretas det en synkronisering mellom PDAen og NetBas, og dataene eksporteres videre til trinn 3 - Kalkyleberegning.
- 4) Det gjennomføres en risikovurdering (**RCM-trinn 0**) av linjen ved bruk av FMECA. Dersom det foreligger tidligere risikovurderinger fra prosjekteringsfasen av den aktuelle linjen, kvalitetssikres disse og benyttes videre. Risikovurderingen tar utgangspunkt i risikofaktorene HMS, omdømme, leveringssikkerhet og leveringskvalitet.
- 5) Etter at risikovurderingen er gjennomført, bestemmes risikokonsekvensen (**RCM-trinn 1**).
- 6) Dersom det viser seg at tilstanden og risikoen til linjen er «ok» settes det et nytt befaringsstidspunkt for linjen. Dersom tilstanden og risikoen ikke er «ok» fortsetter prosessen med spesifisering av alternativer.
- 7) Det settes opp tiltaks- og fornyelsesalternativer som kan redusere risikoen og forbedre tilstanden. Her vil også andre kvalitative faktorer bli vurdert. Dette kan blant annet være fremtidsbehov i form av forsterkninger av overføringskapasitet, gyllene muligheter som for eksempel planlagt anleggsarbeid etc.
- 8) Alternativene kalkuleres for å finne det mest kostnadseffektive alternativet. Her sammenlignes nullalternativet (A0), tiltaksalternativet (A1) og fornyelsesalternativet (A2).
- 9) Resultatene fra kalkylen og risikoanalysen oppsummeres i trinn 4, hvor det må tas en beslutning om hvorvidt ett eller flere tiltak er brukbart og effektivt (**RCM-trinn 2**), eller om det det må gjennomføres en fornyelse av linjen (redesign). Dersom ett eller flere tiltak viser seg å være brukbart og effektivt utarbeides det en arbeidsordre som sendes til entreprenør. Dersom det viser seg at tiltak ikke er brukbart og effektivt må det prosjekteres ny linje. I prosjekteringsfasen gjennomfører man en FMECA og/eller HAZOP (**RCM-trinn 0**).
- 10) Entreprenør gjennomfører arbeidsordene. Nytt befaringsstidspunkt registreres for linjen.
- 11) Data registreres i NetBas.



Figur 6-6: Flytskjema for fornyelsesvurderingsprosessen

6.5 Trinn 1 – Datainnsamling

Trinn 1 omhandler tilstandsvurderingen av anlegget som skal befares. Dette trinnet står for befaringen av anlegget og innsamlingen av data.

6.5.1 Om fornyelsesbefaring

Fornyelsesbefaring er et tiltak som AE Nett ønsker å videreutvikle i forbindelse med fornyelsesvurdering av elektriske anlegg, hvor det i første omgang er avgrenset til høyspente luftlinjer i distribusjonsnett.

Fornyelsesbefaringen vil bli en del av AE Netts prosedyrer for tilstandsbeskrivelse av høyspente luftlinjer i distribusjonsnett. Per i dag finnes det ulike tilstandskontroller som skal avdekke forhold som har betydning for driftssikkerheten og personsikkerheten, i tillegg til å avdekke eventuelle forskriftsstridige forhold. Hensikten med fornyelsesbefaringen er å gi beslutningsstøtte ved fornyelse av anleggsdeler på individnivå og utarbeidelse av konkrete fornyelsesstrategier for grupper av anlegg [12].

6.5.2 Forberedelser før befarings

Før linjen skal befares må aktuell informasjon innhentes. Dette gjelder blant annet linjeprofiler, terrengkart, tidligere befaringsnotater, komponenttyper etc. Dette vil gi et førstinntrykk av linjen. Det kan også være hensiktsmessig å kontrollere informasjonen opp mot linjen under befaringen, for å kvalitetssikre dataene.

6.5.3 PDA

AE Nett har kjøpt en systemløsning for innsamling av avviksdata i forbindelse med inspeksjonsrutiner. Dette er en tilleggsmodul i NetBas. Modulen muliggjør at brukeren kan registrere avvik på en PDA (nettbrett) istedenfor på ark. Systemet tar utgangspunkt i en app kalt SpeedyCraft som er direkte koblet opp mot AE Netts NIS-system NetBas. Bruken av PDA er en relativ ny driftsløsning, og er per i dag kun benyttet i forbindelse med inspeksjonsrutinene.

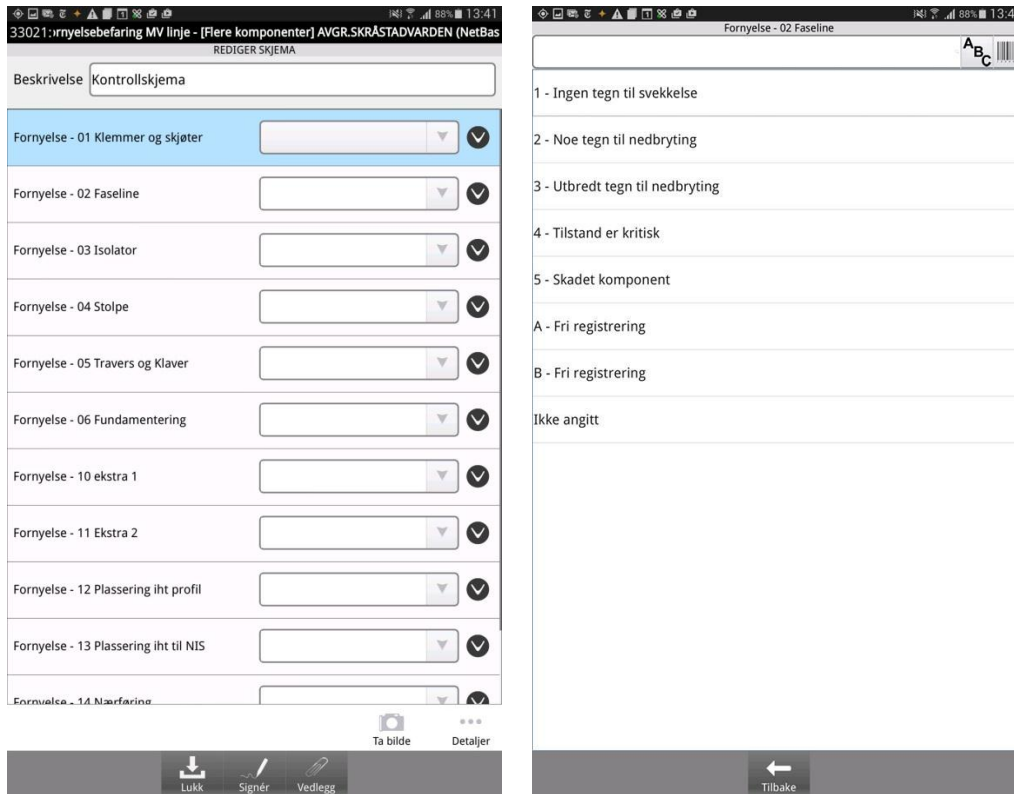
Ved inspeksjon sorteres det ut data for de aktuelle linjene som skal inspiseres. Linjene systematiseres i en liste som videre sendes ut som et arbeidsoppdrag til PDA-serveren (SpeedyCraft). Videre foretas det en synkronisering som medfører at oppdraget sendes over til den aktuelle PDA-en.

Brukeren av PDA-en gjennomfører en befarings/inspisering av det aktuelle nettanlegget hvor det skal registreres avvik. Når inspiseringen er ferdig synkroniseres de registrerte dataene med SpeedyCraft-serveren, og dersom oppdraget konkluderes ferdig synkroniseres dataene videre til NetBas.

Når dataene er synkronisert opp mot NetBas vil avvikene være tilgjengelig for gjennomgåelse. Når de ulike avvikene er gjennomgått sendes det ut en arbeidsordre til en entreprenør. Ved gjennomført oppdrag registreres avvikene som rettet i modulen. Inspeksjonsrutinen finnes i vedlegg K.

Vi så muligheten for å implementere PDA-prosessen fra inspeksjonsrutinene til fornyelsesvurderingsprosessen. Fornyelsesbefaringene ble tidligere gjennomført ved bruk av penn og papir, for videre manuell innfylling av resultatene i et Excel-dokument. Etter veldig positive tilbakemeldinger fra systemansvarlig NetBas vedlikehold, Jarle Stokke-Olsen, ble det satt i gang en prosess for utvikling av PDA-løsning for fornyelsesbefaring.

Den nye løsningen bygger på samme prinsipper som for inspeksjon, hvor det nå gjennomføres tilstandsregistrering istedenfor avviksregistrering. Mastepunktene synliggjøres i en kart-modul, og tidligere informasjon om linjen – årstall, plassering mm. – er tilgjengelig. Kontrollspørsmålene fremvises systematisk i en liste på PDAen, hvor hvert kontrollspørsmål inneholder gitte svaralternativer for hvert enkelt kontrollspørsmål. Se bilde 6-1 for eksempel.



Bilde 6-1: Kontrollspørsmålene i PDA-modulen - Befaring

6.5.4 Brukerhåndbok for fornyelsesbefaring

Brukerhåndboken for fornyelsesbefaring vil bli et av flere innspill til hvordan vi mener AE Nett bør utføre fremtidige fornyelsesbefaringer. Brukerhåndboken skal fungere som en veiledning i forbindelse med fornyelsesvurderingsprosessen, hvor det blant annet vil bli gitt informasjon og veiledningstekst til karaktersetning for de ulike komponentene som skal vurderes. I tillegg inneholder håndboken utstyrsliste, levetidsmodeller, innspill til vurdering etc. Brukerhåndboken bygger i stor grad på resultatene fra SYSLIFE-prosjektet i regi av Energi Norge [7], og RENs vedlikeholdsdokumenter [39] [40]. Se vedlegg B.

Veiledningsteksten inneholder nøkkelord for vurdering av enkelt komponenter og er utarbeidet i samarbeid med AE Nett. Det vil være mulighet til å oppdatere verdiene og informasjonen etter hvert som man tilegner seg ny kunnskap.

Idéen bak brukerhåndboken er å skape en felles forståelse og oppfatning for hvordan man bør gå frem for å utføre en fornyelsesvurdering, og en systematisk oversikt over hvilke tilstander som fører til hvilke karakterer. Et stort problem man kan møte på i forbindelse med karaktersetning er den subjektive vurderingen som kan være forskjellig ut ifra hvilke arbeidsoppgaver eller erfaring en har. En brukerhåndbok vil kunne hjelpe til å skape et felles utgangspunkt for karaktersetning.

6.5.5 Andre verktøy

For å avdekke tilstanden til komponentene benyttes ofte ulike verktøy. Dette kan for eksempel være kjernebor for å avdekke råte, kikkert for å se etter overflatesår og avvik i mastetopp, hammer for å høre etter hulrom som følge av kjerneråte etc. Verktøyene varierer med hvilke anlegg som skal kontrolleres.

6.5.6 Gjennomføring av befaring

Selve befaringen utføres ved at én eller flere medarbeidere befarer linjen fra bakkenivå. Det vanlige er å gå fra mastepunkt til mastepunkt og tilstandsvurdere komponentene underveis. Tilstandsverdiene føres inn i et skjema på PDAen. Det kan være hensiktsmessig at flere medarbeidere går befaringen sammen, da karakterene kan diskuteres og subjektivitet kan filtreres vekk, særlig i forbindelse med opplæring av fornyelsesbefarende.

6.5.7 Videreføring av resultater

Etter at tilstandsvurderingen er utført, vil man ved bruk av PDA synkronisere all datafangst opp mot NetBas (Trinn 1.0 Data). Dataene vil så enkelt kunne eksporteres over til Excel. Se figur 6-7. Kontrollpunktene som blir tatt med kan varieres etter behov, men inneholder informasjon om blant annet: Nettnivå, komponenttype, kontrollpunkt, alvorlighetsgrad, anmerkning, dato, status, driftsmerking og hvem som rapporterte.

| Nettnivå | Aktiv | Avvik | Komponenttype | Kontrollpunkt | Alvorlighetsgrad |
|----------|-------|-------|---------------|---------------------------------------|---------------------------------|
| 2.MVL | 1 | 1 MS | MS | Fornyelse - 01 Klemmer og skjøter | 3 - Utbredt tegn til nedbryting |
| 2.MVL | 1 | 1 MS | MS | Fornyelse - 02 Faseline | 4 - Tilstand er kritisk |
| 2.MVL | 1 | 1 MS | MS | Fornyelse - 03 Isolator | 3 - Utbredt tegn til nedbryting |
| 2.MVL | 1 | 1 MS | MS | Fornyelse - 04 Stolpe | 5 - Skadet komponent |
| 2.MVL | 1 | 1 MS | MS | Fornyelse - 05 Travers og Klaver | 3 - Utbredt tegn til nedbryting |
| 2.MVL | 1 | 1 MS | MS | Fornyelse - 06 Fundamentering | 4 - Tilstand er kritisk |
| 2.MVL | 1 | 1 MS | MS | Fornyelse - 12 Plassering iht profil | Ja |
| 2.MVL | 1 | 1 MS | MS | Fornyelse - 13 Plassering iht til NIS | Ja |
| 2.MVL | 1 | 1 MS | MS | Fornyelse - 14 Nærføring | Ja |
| 2.MVL | 1 | 1 MS | MS | Fornyelse - 15 Ryddebelte | Ja |

Figur 6-7: Et utdrag fra datasettet for Skråstadvarden - Trinn 1.0 Data

Det registreres en tilstandskarakter på hver enkelt komponent i hvert mastepunkt. Disse karakterene samles så opp i en pivot-tabell, hvor antallet av hver karakter summeres opp for hver enkelt komponenttype (Trinn 1.1 Pivot). Se figur 6-8.

| Antall av Alvorlighetsgrad | Kolonnetiketter | | | | Totalsum |
|----------------------------------|-----------------------------|---------------------------------|-------------------------|----------------------|------------|
| Radetiketter | 2 - Noe tegn til nedbryting | 3 - Utbredt tegn til nedbryting | 4 - Tilstand er kritisk | 5 - Skadet komponent | |
| Fornyelse - 02 Faseline | 1 | 8 | 11 | | 20 |
| Fornyelse - 03 Isolator | 3 | 15 | 2 | | 20 |
| Fornyelse - 04 Stolpe | 2 | 14 | 3 | 1 | 20 |
| Fornyelse - 05 Travers og Klaver | 3 | 17 | | | 20 |
| Fornyelse - 06 Fundamentering | 9 | 5 | 4 | 2 | 20 |
| Totalsum | 18 | 59 | 20 | 3 | 100 |

Figur 6-8: Pivot-tabell av datasettet - Trinn 1.1 Pivot

6.6 Trinn 2 – Risikovurdering og alternativer

Etter at det er blitt foretatt en tilstandsvurdering påfølger det risikovurdering og andre kvalitative vurderinger som er med på å påvirke den totale vurderingen. Disse bør settes av selskapet selv, ut i fra hva som påvirker risikoen for nettselskapet.

Etter at det er foretatt en tilstandsbefaring vil det være hensiktsmessig å gjennomføre en FMECA for å identifisere feil og farer som kan oppstå. Hensikten med en FMECA er å identifisere deler eller egenskaper ved systemet som bør forbedres for å møte fastsatte krav til sikkerhet eller pålitelighet. Dette kan omfatte avvik som fremkommer i oppstarts- eller driftsfasen, eller ved vedlikehold.

Bruk av FMECA og/eller HAZOP bør implementeres i designfasen av et prosjekt. I forbindelse med risikovurdering av en høyspent linje, innhentes informasjonen i risikovurderingen, for deretter å kvalitetssikres og oppdateres. Hvis det ikke foreligger slik informasjon, bør en risikoanalyse gjennomføres etter at linjen er tilstandsbefart da informasjonen om linjen ligger friskt i minne.

Noen eksempler på risikovurderinger kan være [41]:

- HMS
- Forsyningsikkerhet
- Forsyningskvalitet
- Omdømme

Risiko kan for eksempel fremstilles i risikomatriser, som angir sannsynlighet og konsekvens av ulike hendelser (kapittel 4.4.4). Risikomatriser kan også benyttes uten «harde» konsekvenser og sannsynligheter, slik at disse angis på en skala fra «lav» til «høy». Kombinasjonen av høy sannsynlighet og alvorlig konsekvens vil da gi den høyeste risikoen, mens lav sannsynlighet og liten konsekvens vil gi laveste risiko.

Hvis det viser seg at risikoen og tilstanden er akseptabel behøves ingen tiltak på linjen, og man kan da avslutte fornyelsesvurderingen og oppdatere befaringsstidspunktet. Dersom tilstanden og risikoen er uakseptabel skal man i dette trinnet vurdere de alternativer som er aktuelle for linjen. Alternativene må defineres slik at riktige parametere blir med videre i kalkylen i trinn 3.

Et av tiltakene kan for eksempel være å skifte ut enkelte dårlige komponenter. Hvis dette alternativet skal vurderes må karakterene for de komponentene som skiftes ut oppdateres slik at de tilsvarer en ny komponent (Trinn 2.0 – Karaktertabell). Se figur 6-9. I denne figuren har karakterene for de komponentene som dømmes ut av linjen blitt fjernet, og man setter inn de nye komponentene med karakter 1. Snittverdien både før og etter tiltak beregnes, slik at linjens tilstandsverdi kan kommuniseres i trinn 4. Vektingsprosenten er satt i samråd med AE Nett, og beskriver økonomisk betydning av komponenten.

| Før tiltak | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | Totalsum | Snittverdi | Vektning | Verdi |
|----------------------------------|----------|-----------|-----------|-----------|----------|------------|------------|--------------|-------------|
| Fornyelse - 02 Faseline | | 1 | 8 | 11 | | 20 | 3,50 | 30 % | 1,05 |
| Fornyelse - 03 Isolator | | 3 | 15 | 2 | | 20 | 2,95 | 10 % | 0,30 |
| Fornyelse - 04 Stolpe | | 2 | 14 | 3 | 1 | 20 | 3,15 | 35 % | 1,10 |
| Fornyelse - 05 Travers og Klaver | | 3 | 17 | | | 20 | 2,85 | 15 % | 0,43 |
| Fornyelse - 06 Fundamentering | | 9 | 5 | 4 | 2 | 20 | 2,95 | 10 % | 0,30 |
| Totalsum | 0 | 18 | 59 | 20 | 3 | 100 | | 100 % | 3,17 |

| Etter tiltak | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | Totalsum | Snittverdi | Vektning | Verdi |
|----------------------------------|-----------|-----------|-----------|----------|----------|------------|------------|--------------|-------------|
| Fornyelse - 02 Faseline | 11 | 1 | 8 | | | 20 | 1,85 | 30 % | 0,56 |
| Fornyelse - 03 Isolator | 2 | 3 | 15 | | | 20 | 2,65 | 10 % | 0,27 |
| Fornyelse - 04 Stolpe | 4 | 2 | 14 | | | 20 | 2,50 | 35 % | 0,88 |
| Fornyelse - 05 Travers og Klaver | | 3 | 17 | | | 20 | 2,85 | 15 % | 0,43 |
| Fornyelse - 06 Fundamentering | 6 | 9 | 5 | | | 20 | 1,95 | 10 % | 0,20 |
| Totalsum | 23 | 18 | 59 | 0 | 0 | 100 | | 100 % | 2,32 |

Kommentar:

I tabell "Før tiltak" må verdiene fra pivot-tabellen limes inn, slik at kalkylen får tilgang til dataene.

I tabellen "Etter Tiltak" må karakterene endres slik at komponentene som byttes ut får tilstandskarakter 1.

Figur 6-9: Tilstandskarakterstabeller – Trinn 2.0 Karaktertabell

Alternativene må også sjekkes opp mot systemmuligheter. For eksempel må man se om andre linjer i området skal ombygges, og om dette kan frigjøre enkelte linjer. Det kan for eksempel tenkes at det ikke lenger er behov for den linjen som vurderes, og at den kan fjernes helt. Eksempler på slike vurderinger kan være [12]:

- Ombygging til kabel
- Ny trasé
- Ombygging til lavspent/høyspent (1000 V)
- Befolkningsvekst/lastøkning
- Nettutviklingsplaner (NUP)
- Tilknyttet anleggsarbeid

Alternativkostnaden ved å måtte bygge om anlegget i fremtiden, pga. endrede forutsetninger, bør også vurderes. Dette er en kostnad som ikke inkluderes i kalkylen, og den bør således tas med i den kvalitative vurderingen.

6.7 Trinn 3 – Kalkulering av kostnader

Trinn 3 av fornyelsesvurderingsprosessen består av stokastisk simulering og kalkulering av kostnadene for de ulike alternativene, basert på datainnsamlingen fra trinn 1 og alternativene fra trinn 2. Alternativene er:

- (A0) nullalternativet, som er alternativet uten noen tiltak
- (A1) enkle tiltak, som omfatter utskiftning blant annet av enkeltkomponenter og eventuelt endring av tilsynsintervall for linjen. Såkalte risikoreduserende tiltak (RRM).
- (A2) totalfornyelse av linjen, hvor hele linjen skiftes ut.

Da oppgavens formål ikke innebærer å gjøre nøyaktige analyser av linjer eller komponenter, men heller å vise hvordan ulike risikoverktøy kan benyttes i en fornyelsesvurderingsprosess, har vi valgt å foreta noen forenklinger og avveininger. I trinn 3 medfører dette blant annet at:

- Komponentene som vurderes deles ikke opp i ytterligere underkomponenter eller antall. Det vil for eksempel si at et isolatorsett i et mastepunkt vurderes som én enhet, og at alle feil og utskiftninger gjelder hele enheten.
- Analysen begrenser seg til de tre alternativene som nevnt over.
- Det beregnes kun nytte i operativ dimensjon. Risiko i miljø- og sikkerhetsdimensjonene utelates (kapittel 4.11.4).

I den økonomiske beregningen av alternativene benyttes både deterministiske og stokastiske variabler. De stokastiske variablene er tiden til svikt for hver komponent, samt avbruddstiden per feil. Dette medfører at resultatet av beregningene er stokastisk – det vil altså bli produsert en sannsynlighetsfordeling som beskriver sannsynligheten for ulike besparingsbeløp. Dette er en viktig del av fornyelsesvurderingsprosessen, da det gjør brukeren oppmerksom på at besparingsbeløpet ikke er gitt, og at det endelige resultatet avhenger av usikkerheter som gjør det vanskelig å anslå et endelig beløp. Et deterministisk resultat vil kunne gi et ureelt inntrykk av at det eksisterer et sikkert resultat.

Vi har i trinn 3 valgt å fokusere på fire kostnadskategorier – energitap i linje, KILE-kostnader, investeringer, samt drift og vedlikehold. Denne beslutningen har blitt tatt i samråd med AE Nett, og baserer seg på retningslinjer fra interne styringsdokumenter. Dette kalles av AE Nett for «Minimum 4»-prinsippet. Kostnadene i disse kategoriene er relativt enkle å beregne, gitt gode bakgrunnstall, og kan etterprøves gitt gode kostnadsallokeringer.

Det som bringes videre fra trinn 3 til trinn 4 av fornyelsesvurderingsprosessen er sannsynlighetsfordelingen av besparingen for de ulike alternativene.

6.7.1 Beskrivelse av del-ark

Trinn 3 består av ett hovedark og fire bakgrunnsark:

- 1) Trinn 3.0 - Inn- og utdata
- 2) Bakgrunn - Kalkyle
- 3) Bakgrunn - Restlevetid
- 4) Bakgrunn - Levetidsmodeller
- 5) Bakgrunn - Innstillinger

Første ark i trinn 3 består av arket «**Trinn 3.0 Inn- og utdata**». I dette arket føres all informasjon om linjen – utover tilstandskarakterene – slik som byggeår, komponenttyper/material, investeringsbeløp, befaringsintervall, analysehorisont, renter etc. Dette er data som kalkylen benytter seg av for å finne riktige sviktsannsynligheter og kostnader. Dette arket inneholder også resultatene fra kalkylen i form av nåverdier (se tabell 6-3, 6-4 og 6-5 lengre ned i kapittelet).

«**Bakgrunn Kalkyle**» består av de økonomiske beregningene for hver kostnadskategori. Energิตap-kostnadene beregnes ut fra et energitap som justeres med en årlig vekstrate i energiforbruk, og en energisats som justeres etter inflasjon.

Drifts- og vedlikeholdskostnadene består av kostnader til inspeksjon og befarings, reparasjonskostnader ved feil på komponent, og komponentkostnader.

KILE-kostnadene er beregnet ut fra en gjennomsnittlig KILE-sats for linjen multiplisert med avbruddstiden.

Investeringskostnadene er nåverdijusterte avdrag basert på økonomisk levetid for investeringen. I kalkyle-arket foregår beregningene på årsbasis, og summeres opp med nåverdifunksjonen. Et utklipp fra kalkylen kan sees i figur 6-10. Denne viser en del av kostnadskalkylen for A0 nullalternativet.

| Før tiltak | Akkumulert energitap (kWh) | Energisats (kr/kWh) | Tapskostnad | Antall feil | Reparasjonssats (kr/time) | Materiellkostnad |
|------------|----------------------------|---------------------|-------------|-------------|---------------------------|------------------|
| 0 | | | | | | |
| 1 | 930 | kr 0,51 | kr 474 | - | kr 1 020 | kr - |
| 2 | 940 | kr 0,52 | kr 489 | - | kr 1 040 | kr - |
| 3 | 949 | kr 0,53 | kr 503 | - | kr 1 061 | kr - |
| 4 | 958 | kr 0,54 | kr 519 | - | kr 1 082 | kr - |
| 5 | 968 | kr 0,55 | kr 534 | - | kr 1 104 | kr - |
| 6 | 978 | kr 0,56 | kr 551 | - | kr 1 126 | kr - |
| 7 | 987 | kr 0,57 | kr 567 | - | kr 1 149 | kr - |
| 8 | 997 | kr 0,59 | kr 584 | - | kr 1 172 | kr - |
| 9 | 1 007 | kr 0,60 | kr 602 | 1,00 | kr 1 195 | kr 11 951 |
| 10 | 1 017 | kr 0,61 | kr 620 | - | kr 1 219 | kr - |

| Befarings- kostnader | Inspeksjons- kostnader | Drift- og vedlikeholds- kostnader | Akkumulert avbruddstid (timer) | KILE-sats alle linjer (kr/time) | KILE-sats aktuell linje (kr/time) | KILE-kostnader |
|----------------------|------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|----------------|
| kr - | kr 1 618 | kr 1 618 | - | kr 42 330 | kr 515 | kr - |
| kr - | kr 1 650 | kr 1 650 | - | kr 43 177 | kr 525 | kr - |
| kr - | kr 1 683 | kr 1 683 | - | kr 44 040 | kr 536 | kr - |
| kr - | kr 1 717 | kr 1 717 | - | kr 44 921 | kr 547 | kr - |
| kr 3 502 | kr - | kr 3 502 | - | kr 45 819 | kr 558 | kr - |
| kr - | kr 1 786 | kr 1 786 | - | kr 46 736 | kr 569 | kr - |
| kr - | kr 1 822 | kr 1 822 | - | kr 47 670 | kr 580 | kr - |
| kr - | kr 1 858 | kr 1 858 | - | kr 48 624 | kr 592 | kr - |
| kr - | kr 1 895 | kr 18 733 | 4,09 | kr 49 596 | kr 604 | kr 52 064 |
| kr 3 867 | kr - | kr 3 867 | - | kr 50 588 | kr 616 | kr - |

Figur 6-10: Mellomvariabler i kalkylen – Bakgrunn Kalkyle

«**Bakgrunn Restlevetid**» består av en levetidsmodell for hver enkelt komponent linjen. Hver komponenttype sees under ett for hvert mastepunkt, for eksempel et isolatorsett bestående av flere isolatorer, eller en mastekonfigurasjon bestående av flere stolper. Hver enhet plasseres i tabellen ut i fra hvilken komponenttype det er, og hvilken karakter den har. Forventet gjenstående levetid justeres ut fra enhetens alder og hvilken tilstandskarakter den har fått. Figur 6-11 viser restlevetid for komponentene i A0-alternativet, og tilknyttede komponent, komponenttype, tilstandskarakter, pålitelighet og skaleringsparameter. Figur 6-12 viser forventet restlevetid for A2-alternativet.

| Komponent | Komponenttype | Tilstandskarakter | Forventet pålitelighet | Forventet θ | | | | | | | | | | |
|-----------|------------------------|-------------------|------------------------|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Line | Cu | | | | | | | | | | | | | |
| | | 1 | 99 % | 146,73 | | | | | | | | | | |
| | | 2 | 95 % | 110,55 | | | | | | | | | | |
| | | 3 | 80 % | 85,64 | | | | | | | | | | |
| | | 4 | 72 % | 80,37 | | | | | | | | | | |
| | | 5 | 59 % | 73,75 | | | | | | | | | | |
| Levetid | FØR TILTAK (A0) | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
| 41,33 | | | | | | | | | | | | | | |
| 18,27 | 18,27 | 18,27 | 18,27 | 18,27 | 18,27 | 18,27 | 18,27 | 18,27 | | | | | | |
| 13,39 | 13,39 | 13,39 | 13,39 | 13,39 | 13,39 | 13,39 | 13,39 | 13,39 | 13,39 | 13,39 | 13,39 | 13,39 | 13,39 | 13,39 |

Figur 6-11: Forventet restlevetid for gamle komponenter – Bakgrunn Restlevetid

| Levetid | FORNYELSE (A2) | | | | | | | | | | | | | | |
|---------|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 45,00 | 45,00 | 45,00 | 45,00 | 45,00 | 45,00 | 45,00 | 45,00 | 45,00 | 45,00 | 45,00 | 45,00 | 45,00 | 45,00 | 45,00 | 45,00 |
| 67,50 | 67,50 | 67,50 | 67,50 | 67,50 | 67,50 | 67,50 | 67,50 | 67,50 | 67,50 | 67,50 | 67,50 | 67,50 | 67,50 | 67,50 | 67,50 |
| 50,00 | 50,00 | 50,00 | 50,00 | 50,00 | 50,00 | 50,00 | 50,00 | 50,00 | 50,00 | 50,00 | 50,00 | 50,00 | 50,00 | 50,00 | 50,00 |
| 60,00 | 60,00 | 60,00 | 60,00 | 60,00 | 60,00 | 60,00 | 60,00 | 60,00 | 60,00 | 60,00 | 60,00 | 60,00 | 60,00 | 60,00 | 60,00 |

Figur 6-12: Forventet restlevetid for nye komponenter – Bakgrunn Restlevetid

«Bakgrunn Levetidsmodeller» består av Weibull-parameterne og datagrunnlaget for disse (se figur 6-13). Det finnes også tabeller og grafer for plotting av sviktfunksjon $\lambda(t)$, pålitelighetsfunksjon $R(t)$, fordelingsfunksjon $f(t)$ og kumulativ sannsynlighetsfunksjon $F(t)$ for hver komponenttype (vedlegg P). Det er parameterne i dette arket som er grunnlaget for levetidsmodellene i «Bakgrunn - Restlevetid».

| | Linje | Linje | Linje | Linje | Linje |
|--------------------------------|-------|-----------|-------|-------|-------|
| | Cu | FeAl (Al) | Fe | BLX | BLL |
| Middelverdi - μ | 69 | 59 | 55 | 45 | 45 |
| Vx | 0,20 | 0,31 | 0,19 | 0,23 | 0,23 |
| Formparameter - m | 5,76 | 3,53 | 6,04 | 4,86 | 4,86 |
| Skaleringsparameter - θ | 74,28 | 65,54 | 59,27 | 49,09 | 49,09 |
| Weibull | 68,75 | 59,00 | 55,00 | 45,00 | 45,00 |
| Trekant | 71,81 | 58,56 | 51,67 | 48,33 | 48,33 |

Figur 6-13: Datagrunnlag for levetidsmodeller – Bakgrunn Levetidsmodeller

«**Bakgrunn Innstillinger**» består av globale variabler for kalkylen. Dette er variabler og grenser som ikke er situasjons- eller selskapsavhengige, dvs. at de er en del av de tekniske innstillingene. Dette gjelder intervallgrensene for påliteligheten for de ulike tilstandskarakterene, samt innstilling for pålitelighetsintervallet, Δt . Se figur 6-14.

| Tilstandskarakter | Øvre pålitelighetsgrense | Nedre pålitelighetsgrense |
|-------------------|--------------------------|---------------------------|
| 1 | 1 | 0,99 |
| 2 | 0,98 | 0,95 |
| 3 | 0,94 | 0,8 |
| 4 | 0,79 | 0,6 |
| 5 | 0,59 | 0 |

| | |
|---|---|
| Pålitelighetsintervall (Δt) | 5 |
|---|---|

| Linetyper | Cu | FeAL/AL | Fe | BLL | BLX |
|-----------------------|-------------------|----------------|-----------|-----|-----|
| Mastetyper | Kreosotimpregnert | Saltimpregnert | | | |
| Isolator typer | Porselen | Glass | Kompositt | | |
| Traverstyper | Tre | Stål | Aluminium | | |

| | Avbruddstid aldring (minutter) | Avbruddstid ulykke (minutter) |
|--------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|
| Gjennomsnittsverdi - μ | 245,3465517 | 402,8347332 |
| Standardavvik - σ | 304,315351 | 688,8719535 |
| Variasjonskoeffisient - V_x | 1,240349004 | 1,710060967 |
| Formparameter - m | 0,792451306 | 0,560205642 |
| Skaleringsparameter - θ | 215,0656113 | 243,3095448 |

| | m | θ |
|-------------------|------|----------|
| Cu | 5,76 | 74,28 |
| FeAL/AL | 3,53 | 65,54 |
| Fe | 6,04 | 59,27 |
| BLX | 4,86 | 49,09 |
| BLL | 4,86 | 49,09 |
| Porselen | 5,00 | 72,61 |
| Kompositt | 5,69 | 54,06 |
| Glass | 5,69 | 72,08 |
| Stål | 8,18 | 74,25 |
| Tre | 4,38 | 65,85 |
| Aluminium | 6,92 | 64,18 |
| Kreosotimpregnert | 4,65 | 73,83 |
| Saltimpregnert | 6,68 | 51,80 |

Figur 6-14: Globale innstillinger for kalkylen – Bakgrunn Innstillinger

6.7.2 Beskrivelse av fremgangsmetode

Ved bruk av kalkylen kan man basere seg på de allerede underliggende levetidsmodellene, eller oppdatere Weibull-parameterne om man har et bedre datagrunnlag. Det samme gjelder for avbrudds-modelleringen. Parameterne til linjen, og for eventuelle alternativer, føres inn i «trinn 3.0 Inn- og utdata» og benyttes så videre i kalkylen. Parameterne som benyttes er delt opp i *standardparametere* og *alternativspesifikke parametere*.

Standardparameterne ligger inne med forslåtte verdier som kan endres ved behov av bruker. Disse parameterne er:

- Analyseperiode (hvor lang horisont analysen skal ha)
- Diskonteringsrente (renten på alternativinvesteringene)
- Forbruksvekst (årlig vekst i strømforbruk)
- Inflasjon (årlig vekst i konsumpriser)
- Antall kilometer linje (km)
- Feilrettingskostnad (kr/time i kostnader for feilretting)
- Energisats (kr/kWh for ohmsk energitap i linje)
- Inspeksjon (kr/km for inspeksjon av linje)
- Befaring (kr/km for befaring av linje)
- Materialkostnad per feil (kostnader for material som går med til feilretting)

De øvrige parameterne er alternativspesifikke. Det vil si at de er avhengige av det enkelte alternativ som analyseres. Parameterne som faller under denne kategorien er:

- Byggeår (hvilket år linjen ble bygget, alderen blir avledet fra denne)
- [Komponenttype gammel] (brukeren velger hvilke komponenttyper som gjelder for den gamle linjen, for line, mast, travers og isolator)
- [Komponenttype ny] (brukeren velger hvilke komponenttyper som gjelder for den nye linjen og tiltaksalternativet, for line, mast, travers og isolator)
- [Antall nye komponenter] (brukeren velger hvor mange linespenn, mastepunkt, traverser og isolatorsett som installeres ved tiltaksalternativet og fornyelse)
- Inspeksjonsintervall (hvor mange år det skal gå mellom hver inspeksjon)
- Befaringsintervall (hvor mange år det skal gå mellom hver befaring)
- Investeringskostnad (kostnaden på investeringer for de ulike alternativene)
- Økonomisk levetid (økonomisk levetid på investeringen, restverdi avledes av denne)
- Avbruddstid per feil (den stokastiske modellen som beskriver lengden på avbrudd)
- Tid fra feil til gjeninnkobling av tilknyttede linjer (tiden som går med til å isolere feilstedet og koble inn igjen tilknyttede linjer)
- KILE-sats for alle andre linjer som faller ut ved feil (kr/time i KILE-kostnader for avbrudd på tilknyttede linjer)
- KILE-sats for linje som analyseres (kr/time i KILE-kostnader for avbrudd på aktuell linje)
- Energitap per år (det ohmske energitapet per år for linjen)

Eksempler på parameterverdier kan sees i tabell 6-3 og 6-4.

Tabell 6-3: Parametere for de ulike alternativene – Trinn 3.0 Inn- og utdata

| | Før tiltak | Etter tiltak | Fornyelse |
|---|-------------------|-------------------|-------------------|
| INFORMASJON OM GAMMEL LINJE | | | |
| Byggeår | 1954 | 1954 | 2015 |
| Alder | 61 | 61 | 0 |
| Linetype (gammel) | Cu | Cu | |
| Stolpetype (gammel) | Kreosotimpregnert | Kreosotimpregnert | |
| Traverstype (gammel) | Stål | Stål | |
| Isolatortype (gammel) | Porselen | Porselen | |
| INFORMASJON OM NY LINJE | | | |
| Linetype (ny) | | BLL | BLL |
| Stolpetype (ny) | | Kreosotimpregnert | Kreosotimpregnert |
| Traverstype (ny) | | Aluminium | Aluminium |
| Isolatortype (ny) | | Kompositt | Kompositt |
| Antall nye linespenn | | 11 | 20 |
| Antall nye mastepunkt | | 4 | 20 |
| Antall nye traverser | | 6 | 20 |
| Antal nye isolatorsett | | 2 | 20 |
| DRIFT OG VEDLIKEHOLD | | | |
| Inspeksjonsintervall | 1 | 0 | 1 |
| Befaringsintervall | 5 | 1 | 5 |
| INVESTERINGER | | | |
| Investeringskostnad | | kr 300 000 | kr 1 350 000 |
| Økonomisk levetid (år) | | 20 | 35 |
| Restverdi etter analyseperiodens utløp | | kr - | kr 246 099 |
| Investering korrigert for restverdi | | kr 300 000 | kr 1 103 901 |
| Investeringskostnad per år | | kr 28 274 | kr 104 039 |
| KILE | | | |
| Avbruddstid per feil (min) | 245,35 | 245,35 | 245,35 |
| Tid fra feil til gjeninnkobling av andre linjer (min) | 60 | 60 | 60 |
| KILE-sats for alle linjer som faller ut | kr 40 000 | kr 40 000 | kr 40 000 |
| KILE-sats for denne linjen | kr 505 | kr 505 | kr 505 |
| TAP | | | |
| Energitalp per år (kWh) | 921 | 921 | 700 |

Tabell 6-4: Standardparametere – Trinn 3.0 Inn- og utdata

| PARAMETERE | Verdi | Kommentar |
|-------------------------------|-----------|-----------------------------|
| Analyseperiode | 20 | Maks 35 år |
| Diskonteringsrente | 6,98 % | |
| Forbruksvekst | 2 % | Årlig vekst i strømforbruk |
| Inflasjon | 2 % | Årlig vekst i konsumpriser |
| Antall kilometer linje | 2 | |
| Feilrettingskostnad (kr/time) | kr 1 000 | |
| Energisats (kr/kWh) | kr 1,00 | Sats for energitalp i linje |
| Inspeksjon (kr/km) | kr 1 300 | |
| Befaring (kr/km) | kr 2 600 | |
| Materialkostnad per feil | kr 10 000 | |

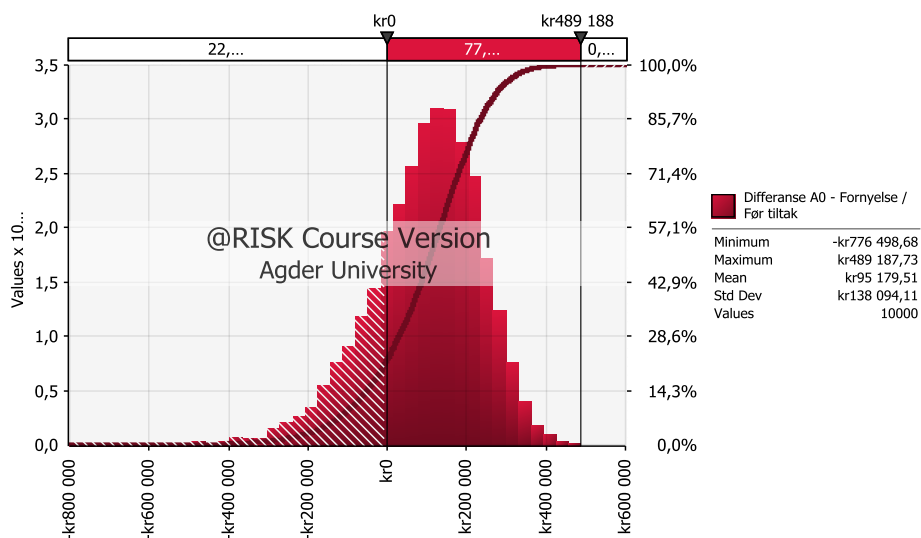
Arket med levetidsmodeller for hver enkelt komponent leser automatisk av tilstandskarakterene fra tabellen i ark «Trinn 2.0 Karaktertabell», og justerer forventet levetid ut fra alder og tilstand (kapittel 6.3.3). Kalkylen henter så forventet restlevetid for hver enkelt komponent, og beregner avbruddstider og kostnader automatisk. Kostnadene som kommer opp i resultatlisten er nå deterministiske. Det vil si at de ikke har noen fordeling. For å produsere en fordeling av sannsynligheter for ulike resultat må ønsket «output» markeres. Deretter kan brukeren velge å kjøre en Monte Carlo-simulering som produserer en sannsynlighetsfordeling. Denne sannsynlighetsfordelingen bør bringes videre i trinn 4 for å vise hvordan resultat-sannsynlighetene fordeler seg.

Eksempler på nåverdiene og resultatene kan sees i tabell 6-5. Figur 6-15 vier en sannsynlighetsfordeling med en sannsynlighet for positivt beløp på 77,6 %. Forventningsverdien ligger på i underkant av 100 000,- NOK. Figuren er ikke basert på verdiene i tabellen.

Tabell 6-5: Nåverdier, resultatgraf og deterministiske resultater – Trinn 3.0 Inn- og utdata

| NÅVERDIER | Før tiltak (A0) | Etter tiltak (A1) | Fornyelse (A2) |
|----------------------------|-----------------|-------------------|----------------|
| NNV - Tap | kr 6 583 | kr 6 583 | kr 5 003 |
| NNV - KILE | kr 950 873 | kr 536 129 | kr 0 |
| NNV - Investeringer | kr 0 | kr 300 000 | kr 1 088 987 |
| NNV - Drift og vedlikehold | kr 441 115 | kr 276 285 | kr 24 466 |
| Totalt | kr 1 398 570 | kr 1 118 997 | kr 1 118 457 |

| RESULTAT | Kostnadsdifferanse | Internrente |
|--------------------------------|--------------------|-------------|
| Velge fornyelse fremfor A0 | kr 280 114 | 8,22 % |
| Velge tiltak fremfor A0 | kr 279 573 | 11,95 % |
| Velge fornyelse fremfor tiltak | kr 540 | -3,73 % |



Figur 6-15: Resultatgraf (besparelse ved å velge fornyelse) fra en Monte Carlo-simulering i @Risk.

6.7.3 Modellering av avbruddstid

Avbruddstiden er modellert ut fra alle avbruddstider relatert til slitasjefeil registrert på kraftledning. Dataene er hentet fra FASIT-statistikken og danner grunnlaget for en Weibull-modellering av avbruddstiden. For slitasjefeil på kraftledning benyttes en Weibull-modell med formparameter lik 0,79 og skaleringsparameter lik 213,47. Dette gir en fordeling lik den i figur 5-15.

6.7.4 Levetidsmodeller

Utformingen av levetidsmodellene har blitt beskrevet i kapittel 6.3. Levetids-modellene som benyttes i trinn 3 velges basert på hvilke materialtyper linjen består av. Det er utviklet levetidsmodeller for følgende komponenttyper:

- Line (Cu, Fe, FeAl/Al, BLL, BLX)
- Stolpe (Kreosotimpregnert, Saltimpregnert)
- Isolator (Porselen, Glass, Kompositt)
- Travers (Tre, Stål, Aluminium)

Levetidsmodellene angir en forventet levetid for komponenten – tiden til første slitasjerelaterte svikt. Disse modelleres som fordelingsfunksjoner og angir derfor sannsynligheter for de ulike sviktaldrene. Tiden til svikt beregnes ut fra analysens tidspunkt, og svikt på en komponent utløser feilrettingskostnader og KILE-kostnader.

6.7.5 Oppdatering av gjenstående levetid

For å kunne estimere den sannsynlige feilraten på komponentene, utover den generiske fellesmodellen for hver komponent, er det nødvendig å oppdatere levetidsmodellene med ny informasjon basert på den avdekte tilstanden. Dette gjøres ved å oppdatere skaleringsparameteren θ , slik at den nye modellen tar hensyn til hvor lenge komponenten har fungert, og hvor raskt slitasjeprosessen har foregått.

Proseduren for å justere forventet levetid basert på tilstand er som følger (kapittel 6.3.3):

- 0) Etabler en levetidsmodell basert på en Weibull-fordeling. Bestem m og θ .
- 1) Finn tilstandskarakter på komponent. Bestem tilstandskarakter og inspeksjonstidspunkt T .
- 2) Finn påliteligheten som tilsvarer den gitte tilstandskarakteren. Bestem $R(T+\Delta t)$.
- 3) Beregne ny θ -verdi for komponenten.
- 4) Lag ny stokastisk modell for levetid, med T som nullpunkt.

Vi benytter at en tilstandskarakter er knyttet opp mot et pålitelighetsintervall som beskriver sannsynligheten for at komponenten overlever det kommende tidsintervallet Δt . Hvis komponentens tilstandskarakter tilsier at den ligger innenfor det pålitelighetsintervallet som også komponentens alder skulle tilsi – det vil si at den har den tilstanden som vi kan forvente ved bare å se på alderen – benyttes påliteligheten som er beregnet fra komponentens alder ved tilstandstidspunktet, T , pluss pålitelighetsintervallet, Δt .

Hvis komponentens tilstandskarakter ligger utenfor pålitelighetsintervallet som levetidsmodellen skulle tilsi, benyttes pålitelighetsgrensen som ligger nærmest tilstandskarakteren. Det vil si at dersom tilstands-karakteren tilsier at komponenten befinner seg i pålitelighetsintervallet mellom **0,8 og 0,94**, mens levetidsmodellen tilsier at påliteligheten er **0,74**, vil komponenten bli tildelt pålitelighet tilsvarende den nedre grensen i intervallet, som her svarer til **0,8**. Dersom levetidsmodellen tilsier en pålitelighet på **0,99** vil den få pålitelighet tilsvarende den øvre intervallgrensen, som her er **0,94**.

Når komponenten har blitt tildelt en pålitelighet beregnes en ny skaleringsparameter, θ , som oppdaterer Weibull-fordelingen med tilstandsinformasjonen. Den oppdaterte Weibull-modellen justeres med nullpunkt i $t=T$ og angir derfor forventet tid til feiling fra befarings-tidspunktet.

6.7.6 Kost-nytte-analyse

CBA (Cost Benefit Analysis) danner grunnlaget for vurderingen av de ulike alternativene. Kost-nytte-analysen baseres på fire kostnadskategorier: Drift og vedlikehold, Investering, KILE og Tap.

Drift- og vedlikeholdskostnadene innebærer kostnader til befarings og inspeksjon, samt feilrettingskostnader ved feil på linjen.

$$\text{Drift og vedlikehold}_n = AA_n * RS_0 * (1 + i)^n + (MK_0 + BK_0 + IK_0) * (1 + i)^n \quad [6-3]$$

| | | |
|--------|---|---|
| AA_n | = | Akkumulert avbruddstid i år n , $AA = \text{antall avbrudd} * \text{avbruddstid}$ |
| RS_0 | = | Reparasjonssats i år null |
| MK | = | Materialkost, $MK = \text{antall feil} * \text{materialsats} * \text{linjekm.}$ |
| BK | = | Befaringskost, $BK = \text{antall befaringer} * \text{befaringssats} * \text{linjekm.}$ |
| IK | = | Inspeksjonskost, $IK = \text{antall inspeksjoner} * \text{inspeksjonssats} * \text{linjekm.}$ |
| i | = | Inflasjon |

KILE-kostnadene baserer seg på avbruddstiden som følge av feil, samt en gjennomsnittlig KILE-sats for linjen.

$$KILE_n = AA_n * KS_{a,0} * (1 + i)^n + \text{antall avbrudd} * KS_{b,0} * GI_b * (1 + i)^n \quad [6-4]$$

| | | |
|------------|---|--|
| $KS_{a,0}$ | = | KILE-sats for linje som analyseres, i år null |
| $KS_{b,0}$ | = | KILE-sats for alle andre linjer som faller ut, i år null |
| GI_b | = | Gjeninnkoblingstid for alle andre linjer som faller ut |

Tapskostnadene er de ohmske tapene i linjen. Kostnadene beregnes slik:

$$\text{Energitalpskostnad}_n = E_0 * (1 + s)^n * ES_0 * (1 + i)^n \quad [6-5]$$

| | | |
|--------|---|----------------------|
| E_0 | = | Energitalp i år null |
| ES_0 | = | Energisats i år null |
| s | = | Forbruksvekst per år |

Investeringskostnadene består av engangskostnader forbundet med gjennomføring av et tiltak eller en fornyelse.

Den akkumulerte avbruddstiden er stokastisk. Det er denne som representerer sannsynligheten i kalkylen. Reparasjonssats, materialsats og KILE-sats representerer konsekvensene i kalkylen.

En del av de normale kostnadene forbundet med en høyspent luftlinje er ekskludert fra denne kalkylen. Dette er hovedsakelig kostnader som er like for alle alternativene.

Kostnadene forbundet med feil på linjen baserer seg på de justerte levetidsmodellene. For hvert år summerer kalkylen opp det forventede antall feil i løpet av det gjeldende året. Levetiden er stokastisk, og vi vil derfor få en forskjellig fordeling av feil for hver iterasjon av Monte Carlo-simuleringen. Hver feil multipliseres så med avbruddstiden, som også er en stokastisk variabel. Hver feil utløser en predefinert materialkostnad, samt en tidsbasert feilrettingskostnad. Avbruddstiden er også basis for KILE-kostnadene.

Kostnadene forbundet med hvert alternativ summeres opp ved hjelp av en nåverdifunksjon. Denne diskonterer et fremtidig beløp med en gitt rente, basert på hva brukeren kunne forvente å få av avkastning ved å plassere midler i andre aktiva:

$$NNV = C_0 + \sum_{n=1}^N \frac{\text{Energitapskostnad}_n}{(1+k)^n} + \frac{\text{Drift og vedlikehold}_n}{(1+k)^n} + \frac{KILE_n}{(1+k)^n} \quad [6-6]$$

Nåverdireultatet av hvert alternativ sammenlignes med hverandre for at brukeren skal kunne se besparelsene forbundet med å velge et alternativ fremfor et annet. En positiv ΔLCC -verdi indikerer besparelse ved å innføre alternativet, og negativ verdi indikerer tap:

$$\Delta LCC_{A1} = NNV_{A0} - NNV_{A1} \quad [6-7]$$

$$\Delta LCC_{A2} = NNV_{A0} - NNV_{A2} \quad [6-8]$$

6.8 Trinn 4 – Oppsummering og beslutning

Formålet med trinn 4 er å sammenstille de kvalitative og kvantitative faktorene for å gi et godt beslutningsgrunnlag for hva som bør gjøres med linjen som vurderes. I dette trinnet vil de ulike risikokategoriene gjennomgås systematisk, og et risikobilde av den aktuelle linjen vil formes. Dette trinnet består av selve vurderingen og beslutningen, og det er viktig at dokumentasjon tas vare på og er tilgjengelig slik at grunnlaget for vurderingen som blir tatt kan undersøkes og etterprøves. Ved systematisk gjennomgang av risikokategoriene og alternativene tvinges brukeren til å tenke igjennom risikokilder. Dette fører også til mer konsise beslutninger, og større muligheter for å kunne samarbeide og diskutere ulike beslutninger.

I RCM-prosessen vil dette være det siste trinnet. Det er her brukeren velger hvilke tiltak som skal iverksettes. Disse tiltakene velges ut fra hva som er «brukbart og effektivt». Dette baseres på hvilke tekniske løsninger som er tilgjengelige, og hva kostnaden ved de ulike tiltakene blir. I vår systematikk vil alternativ A1 være tiltakene som kan velges, mens «A2 fornyelse» vil være alternativet som tilsvarer «redesign». Formålet med prosessen vil derfor være å bestemme om man kan utføre enkle tiltak på linjen, eller om den bør fornyes.

6.8.1 Tilstandsvurdering

Tilstandskarakterene for linjen bør fremstilles, enten som gjennomsnittskarakter for hver komponent, eller som en vektet total karakter, for at det skal kunne dannes et bilde av hvor god eller dårlig linjen er. Det er viktig at de aller dårligste komponentene bemerkes slik at svake punkt på en ellers god linje får oppmerksomhet og blir korrigert.

6.8.2 Kostnadsvurdering

Sannsynlighetsfordelingene for kostnadene av de ulike alternativene, produsert i trinn 3, skal inkluderes for å gi beslutningstakeren et bilde av hvordan sannsynligheten for kostnadene fordeler seg. Ved å benytte en fordeling istedenfor en deterministisk verdi vil brukeren kunne ta usikkerheten med i vurderingen.

Det bør også vurderes om man bør inkludere sannsynlig tid til første feil. Hvis linjen går i et beferdet område vil en feil få store konsekvenser for blant annet HMS og omdømme. Det kan derfor være en viktig del av beslutningsgrunnlaget.

6.8.3 Risikovurdering

Risikoanalysen i trinn 2 oppsummeres og vurderes. Om risikoen vurderes som for høy ved nullalternativet, bør man vurdere tiltak eller fornyelse selv om dette ikke viser seg å være kostnadmessig lønnsomt. Det er særlig viktig at HMS-risiko vurderes her.

6.8.4 Kvalitative vurderinger

De kvalitative faktorene vurderes. Dette inkluderer faktorer som forventet lastøkning, utbyggingsplaner, gylne muligheter etc. Disse er viktige å vurdere, da de påvirker mulige alternativer, investeringskostnadene for hvert enkelt alternativ, samt kostnadene som kommer ved å måtte foreta større endringer frem i tid istedenfor på beslutningstidspunktet. Slike kostnader tas ikke hensyn til i kalkylen så disse må vurderes kvalitativt.

6.8.5 Valg av tiltak

Tiltaket som gir den forventede laveste kostnaden for selskapet – samtidig som man befinner seg innenfor forskriftsmessige grenser og akseptabel risiko – bør velges. Dette baserer seg i første omgang på kostnadene fra kalkylen. Her vil blant annet KILE-kostnader inkluderes, noe som vil gi en indikasjon på hvor samfunnsøkonomisk de ulike alternativene er. Alternativet med det laveste kostnadsnivået kontrolleres så opp mot de ulike risikovurderingene for å se om man befinner seg innenfor akseptable grenser. Hvis risikoen er uakseptabelt høy må et annet alternativ velges. Fornyelse antas å være dyrt i de fleste tilfeller, men med dette alternativet har man høyere grad av frihet til å justere risikoen, da risiko kan «designes» vekk.

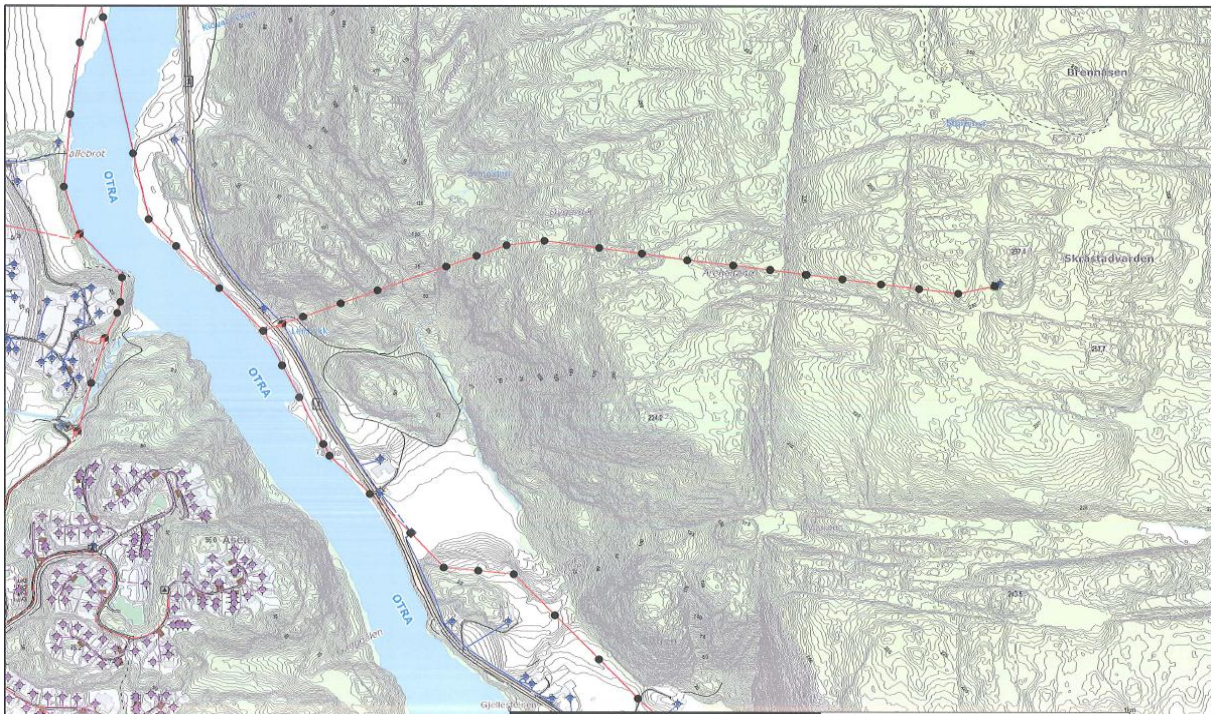
Et forslag til oppsummerings- og beslutningsark finnes i vedlegg L.

Kapittel 7: Testing og evaluering av løsning

Proessen ble testet ut i sin helhet på avgreningslinjen Skråstadvarden. Kalkylen ble også testet på en tenkt referanselinje med bedre tilstand og høyere avbruddskostnader.

7.1 Skråstadvarden case study

Linjen ble plukket ut av AE Nett, da den var svært dårlig, og en tydelig kandidat for fornyelse. Skråstadvarden-linjen er en 24 kV-linje som i hovedsak forsyner en stasjon med sambandsutstyr på Skråstadvarden. Sambandsutstyret benyttes til intern trådløs kommunikasjon. Figur 7-1 viser et utklipp av terrengkart for Skråstadvarden fra NetBas. Av figuren ser man at linjen er plassert i ulendt og meget bratt terreng som kan føre til vanskelige befaringsforhold. Langs deler av linjen finnes det en tursti som gjør at deler av linjens trasé defineres som beferdet område.



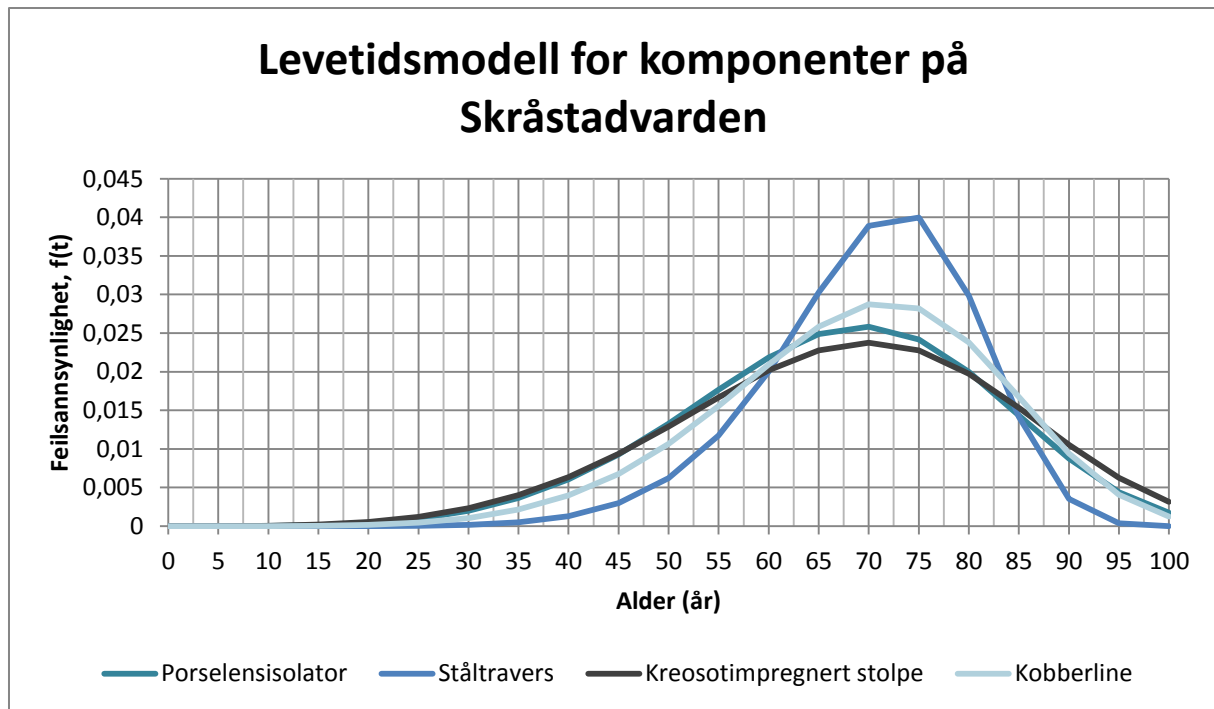
Figur 7-1: Terrengkart og linjekart for Skråstadvarden (NetBas)

Skråstadvarden består av 19 mastepunkt pluss en avgreningsmast på Sødalslinjen langs Otra. Linen og mastepunktene er fra 1954 (NetBas) og tråden er av type Cu 16 (én-trådet massiv kabel).

7.1.1 Komponenttyper

Skråstadvarden er en relativt gammel linje. Linjen ble oppført i 1954, for å forsyne et anlegg som da tilhørte forsvaret, og som senere har blitt overdratt til AE Nett. Linjen består av følgende vurderte komponenter:

- Line 16 Cu (Massiv)
- Stolpe Kreosotimpregnert
- Travers Stål
- Isolator Porselen (med unntak av enkelte utskiftninger)



Figur 7-2: Levetidsmodeller for komponenter på avgrening Skråstadvarden

Vi kan se av figur 7.2 at ståltraversen har en skarpere levetidsmodell enn de andre komponentene. Stolpe, isolator og line har ganske like sannsynlighetsfordelinger. Mellom 70 og 75 år når ståltraversen maksimalt punkt på fordelingsfunksjonen, mens de andre komponentene har en topp rundt 70 år.

Linjeprofilen, med informasjon om materialtyper, terreng, linespenn etc. kan sees i vedlegg M.

7.1.2 Trinn 1 – Tilstandsbefaring

På befaringen ble linjen tilstandsvurdert både med den gamle løsningen på ark, og med den nye løsningen på PDA. På befaringen ble det brukt ulike verktøy for å danne seg et bilde av tilstanden til komponentene. Disse verktøyene ble brukt av erfarne ingeniører. Dette var blant annet:

- Kjernebor – for å undersøke råte i kjerneveden på stolpene
- Hammer – for å undersøke akustisk resonans i stolpen, for å avdekke råte
- Kikkert – for å avsløre avvik i toppen av mastepunktene



Bilde 7-1: Situasjonsbilde fra befaring på Skråstadvarden (mastepunkt #19)

Det var totalt seks personer med på befaringen. Dette var oppgaveforfatterne, veiledere Terje Taraldsen og Syvert Augland, og systemansvarlige NetBas vedlikehold, Jarle Stokke-Olsen og Oddbjørn Berg. Det ble besluttet å følge turstien mot toppen av Skråstadvarden, og følge linjen nedover i terrenget, da dette ble vurdert som den enkleste metoden. Første mastepunkt som ble vurdert var derfor nummer 19.

Hver komponent med kontrollspørsmål ble tilstandsvurdert på hvert enkelt mastepunkt (kapittel 6.5). For linjen ble det vurdert at linedelen som lå fra det inspiserte mastepunktet, mot toppen av Skråstadvarden, skulle vurderes på det respektive mastepunktet. For å sette tilstandskarakterene ble brukerhåndboken som er utviklet i forbindelse med oppgaven benyttet. Veiledningsteksten ble supplert med erfaringen til en del av de befarende og hver tilstandsvurdering ble diskutert før en endelig karakter ble satt.

Karaktergraderingen viste seg å være praktisk under testingen av løsningen, og etter litt øvelse var det lett å plassere tilstandskarakterene på de ulike komponentene.

Det ble oppdaget flere avvik. Blant annet skjeve støttestag, lysbuesår på isolatorer, avbrent jordtråd, skader i mast etter lynnedslag og gjennomrustede stag. Noen av disse avvikene kan sees i bilde 7-2.

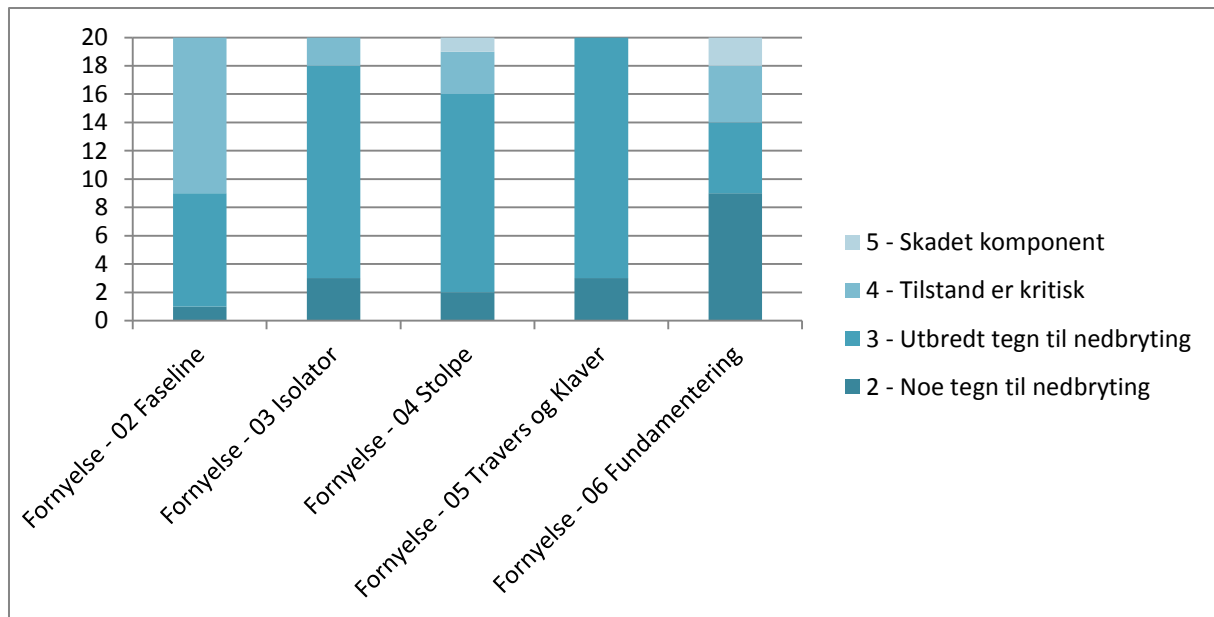


Bilde 7-2: Avvik oppdaget ved befarings på Skråstadvarden

Ved endt befarings ble arkene samlet, og PDAen ble synkronisert mot hovedserveren. Resultatene ble så eksportert som et Excel-ark av Jarle Stokke-Olsen for videreføring til kalkylen i trinn 3. Inkludert avgreningsmasten ved hovedlinjen Augland-Sødal ble totalt 20 mastepunkt vurdert. Karakterene for disse kan sees i figur 7-3 og tabell 7-1. Faselinen var komponenttypen med dårligst snittkarakter. Det ble også oppdaget skadede stolper med klatreforbud, to meget rustangrepne stag, og mange skjøter fra tidligere feilretting på line.

Tabell 7-1: Tilstandskarakterer for Skråstadvarden – Trinn 1.0 Pivot

| Originalt | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | Totalsum | Snittverdi | Vektning | Verdi |
|---------------------------------|----------|-----------|-----------|-----------|----------|------------|------------|--------------|-------------|
| Fornylse - 02 Faseline | | 1 | 8 | 11 | | 20 | 3,50 | 30 % | 1,05 |
| Fornylse - 03 Isolator | | 3 | 15 | 2 | | 20 | 2,95 | 10 % | 0,30 |
| Fornylse - 04 Stolpe | | 2 | 14 | 3 | 1 | 20 | 3,15 | 35 % | 1,10 |
| Fornylse - 05 Travers og Klaver | | 3 | 17 | | | 20 | 2,85 | 15 % | 0,43 |
| Fornylse - 06 Fundamentering | | 9 | 5 | 4 | 2 | 20 | 2,95 | 10 % | 0,30 |
| Totalsum | 0 | 18 | 59 | 20 | 3 | 100 | | 100 % | 3,17 |



Figur 7-3: Resultater fra befarings på Skråstadvarden – Trinn 1.0 Pivot

7.1.3 Trinn 2 – Risikovurdering

I trinn 2 ble det gjennomført en kortfattet risikoanalyse i samarbeid med AE Nett. Følgende kvalitative faktorer ble vurdert:

1) HMS

Enkelte områder under linjen er beferdet. På selve Skråstadvarden er det et sterkt beferdet turområde. Falls linjen i disse områdene kan det føre til skader på mennesker. En fornyelse av linjen vil kunne redusere denne risikoen. Det ble også oppdaget manglende jording ved sikringsboksen til transformatoren ved mast nummer 19.

2) Forsyningsikkerhet/KILE

Linjen forsyner en radiokommunikasjonsstasjon som eies av Agder Energi. Denne stasjonen benyttes for internt samband via VHF. Linjen til Skråstadvarden forsyner ingen andre, men en feil på denne linjen vil føre til utfall av hovedlinjen Augland-Sødal, og KILE-kostnadene vil beløpe seg til 41 500,- pr time frem til denne linjen kobles inn igjen. Fornyelse av linjen, eller en fjernstyrt bryter på avgrensingen mot Skråstadvarden, vil derfor kunne forbedre forsyningsikkerheten og redusere KILE-kostnadene.

I tillegg ble andre kvalitative faktorer gjennomgått på stedet med AE Nett:

- Omdømme – linjen er mekanisk svak og går over tursti. Kan påvirke omdømmet negativt.
- Fremtidig lastøkning – ingen forventet lastøkning i fremtiden
- Forsyningskvalitet – linjen er elektrisk dimensjonert for lasten
- Gylden mulighet – ingen gyllne muligheter foreligger

Det ble også gjennomført en kortfattet FMECA-analyse for å definere hvilke feil og farer som kan oppstå. Analysen ble utført av studentene i samarbeid med AE Nett. Ideelt vil slike analyser allerede vært utført i forbindelse med prosjektering av den aktuelle linjen. Ettersom en analyse ikke forelå i

dette tilfelle ble det valgt å presentere funksjonen til FMECA-analysen og hvordan den kan brukes i forbindelse med fremtidige fornyelsesvurderingsprosesser og RCM-analyser. FMECA-analysen er beskrevet i vedlegg G.

Det er viktig å nevne at prosessen ble revidert på et tidspunkt etter testingen av løsningen. Det ble blant annet bestemt at det skulle gjennomføres risikoanalyse og alternativvurdering mellom befaring og kalkyle, istedenfor i oppsummeringen slik prosessen var på test-tidspunktet. Dette betyr at det ikke ble foreslått alternativer før kalkylestadiet. Risikoanalysen var heller ikke omfattende, og derfor er denne delen av testen mangelfull sett i lys av den reviderte prosessen. Noen alternativer ble likevel snakket om i ettertid. Alternativer som kan vurderes var i følge AE Nett blant annet ny 24 kV BLL høyspentlinje, 24 kV hengekabel og 400/1000 V EX-hengekabel.

7.1.4 Trinn 3 – Kalkyle

Tilstandskarakterene fra befaringen kan sees i tabell 7-1. Som tidligere beskrevet henter kalkylen automatisk tilstandskarakterene fra tilstandskarakter-tabellen. Parameterne som ble benyttet i kalkylen kan sees i tabell 7-3. Tabell 7-2 viser standardparameterne, nåverdiene og det deterministiske resultatet.

Tabell 7-2: Parametere og nåverdier for Skråstadvarden-kalkyle – Trinn 3.0 Inn- og utdata

| PARAMETERE | Verdi | Kommentar |
|-------------------------------|-----------|----------------------------|
| Analyseperiode | 20 | Maks 35 år |
| Diskonteringsrente | 6,56 % | |
| Forbruksvekst | 1 % | Årlig vekst i strømforbruk |
| Inflasjon | 2 % | Årlig vekst i konsumpriser |
| Antall kilometer linje | 1,22 | |
| Feilrettingskostnad (kr/time) | kr 1 000 | |
| Energisats (kr/kWh) | kr 0,50 | Sats for energitap i linje |
| Inspeksjon (kr/km) | kr 1 300 | |
| Befaring (kr/km) | kr 2 600 | |
| Materialkostnad per feil | kr 15 000 | |

| NÅVERDIER | Før tiltak (A0) | Etter tiltak (A1) | Fornyelse (A2) |
|----------------------------|-----------------|-------------------|----------------|
| NNV - Tap | kr 6 583 | kr 6 583 | kr 5 003 |
| NNV - KILE | kr 950 873 | kr 536 129 | kr 0 |
| NNV - Investeringer | kr 0 | kr 300 000 | kr 1 088 987 |
| NNV - Drift og vedlikehold | kr 441 115 | kr 276 285 | kr 24 466 |
| Totalt | kr 1 398 570 | kr 1 118 997 | kr 1 118 457 |

| RESULTAT | Kostnadsdifferanse | Internrente |
|--------------------------------|--------------------|-------------|
| Velge fornyelse fremfor A0 | kr 280 114 | 8,22 % |
| Velge tiltak fremfor A0 | kr 279 573 | 11,95 % |
| Velge fornyelse fremfor tiltak | kr 540 | -3,73 % |

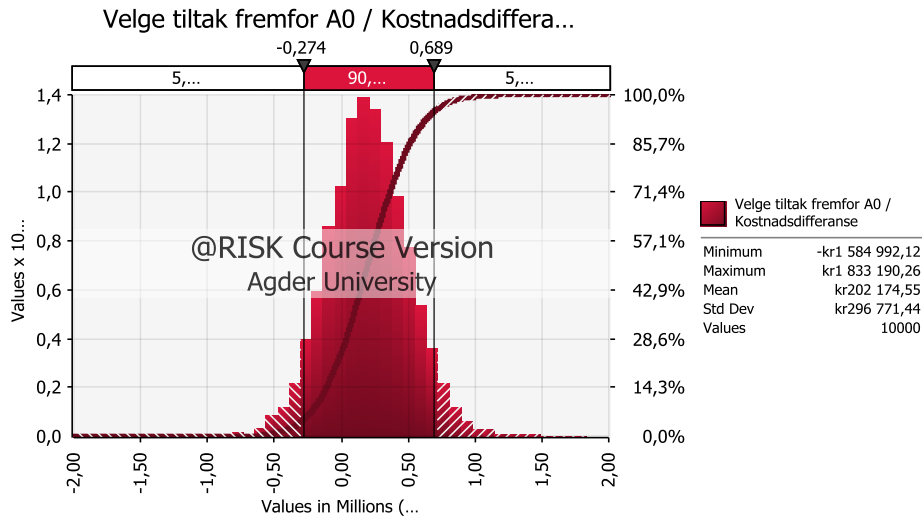
Tabell 7-3: Variabler for kalkulering av Skråstadvarden – Trinn 3.0 Inn- og utdata

| | Før tiltak | Etter tiltak | Fornyelse |
|---|-------------------|-------------------|-------------------|
| INFORMASJON OM GAMMEL LINJE | | | |
| Byggeår | 1954 | 1954 | 2015 |
| Alder | 61 | 61 | 0 |
| Linetype (gammel) | Cu | Cu | |
| Stolpetype (gammel) | Kreosotimpregnert | Kreosotimpregnert | |
| Traverstype (gammel) | Stål | Stål | |
| Isolatorstype (gammel) | Porselen | Porselen | |
| INFORMASJON OM NY LINJE | | | |
| Linetype (ny) | | BLL | BLL |
| Stolpetype (ny) | | Kreosotimpregnert | Kreosotimpregnert |
| Traverstype (ny) | | Aluminium | Aluminium |
| Isolatorstype (ny) | | Kompositt | Kompositt |
| Antall nye linespenn | | 11 | 20 |
| Antall nye mastepunkt | | 4 | 20 |
| Antall nye traverser | | 6 | 20 |
| Antal nye isolatorsett | | 2 | 20 |
| DRIFT OG VEDLIKEHOLD | | | |
| Inspeksjonsintervall | 1 | 0 | 1 |
| Befaringsintervall | 5 | 1 | 5 |
| INVESTERINGER | | | |
| Investeringskostnad | | kr 300 000 | kr 1 350 000 |
| Økonomisk levetid (år) | | 20 | 35 |
| Restverdi etter analyseperiodens utløp | | kr - | kr 261 013 |
| Investering korrigert for restverdi | | kr 300 000 | kr 1 088 987 |
| Investeringskostnad per år | | kr 27 357 | kr 99 304 |
| KILE | | | |
| Avbruddstid per feil (min) | 245,35 | 245,35 | 245,35 |
| Tid fra feil til gjeninnkobling av andre linjer (min) | 60 | 60 | 60 |
| KILE-sats for alle linjer som faller ut | kr 41 500 | kr 41 500 | kr 41 500 |
| KILE-sats for denne linjen | kr 505 | kr 505 | kr 505 |
| TAP | | | |
| Energitap per år (kWh) | 921 | 921 | 700 |

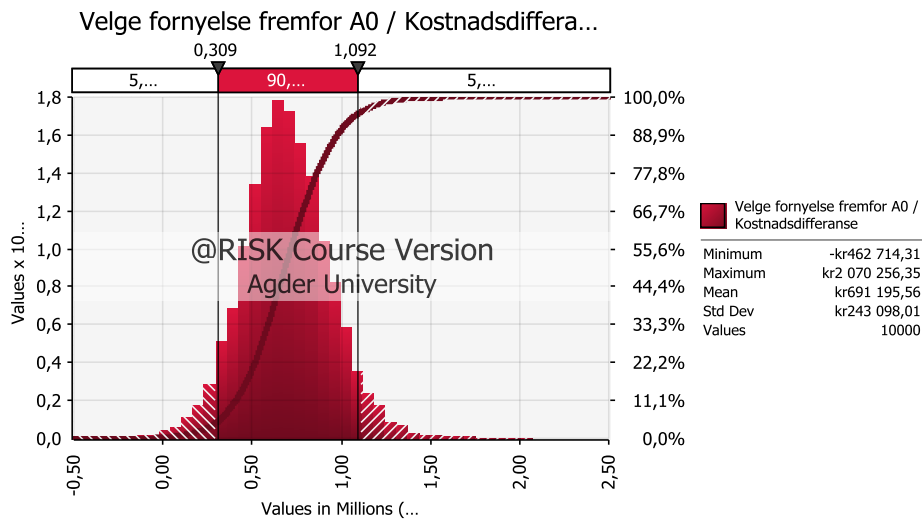
Det ble kjørt en simulering med 10 000 iterasjoner på kalkylen. Resultatet for tiltak vises i figur 7-4, og resultatet for fornyelse vises i figur 7-5. Alternativet med tiltak ga sannsynlighet for negativ nåverdi på ca. 20 %. Forventningsverdien av kostnadsbesparelse i Monte Carlo-simuleringen var ca. 200 000,- (figur 7-4).

Fornyelse ga en neglisjerbar lav sannsynlighet for negativt beløp, det vil si svært høy sannsynlighet for kostnadsbesparelse. Simuleringen ga forventningsverdi på ca. 690 000,- (figur 7-5)

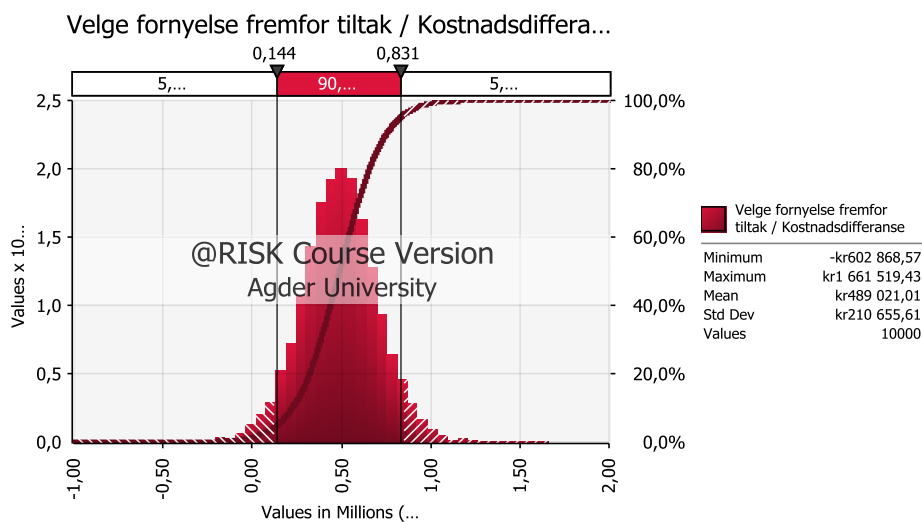
Av resultatet i figur 7-6 er det klart at fornyelse er det beste alternativet når vi benytter absolutt kostnadsbesparelse, med en forventet lavere kostnad på 490 000,- sett opp mot tiltak, og 690 000,- sett opp mot nullalternativet (figur 7-5). Sannsynligheten for at fornyelse ikke gir mer kostnadsbesparelse enn tiltak er ca. 2 %. Fornyelsesalternativet har også en skarpere sannsynlighetsfordeling med lavere spredning enn tiltaksalternativet, som betyr at usikkerheten i fornyelsesalternativet er lavere.



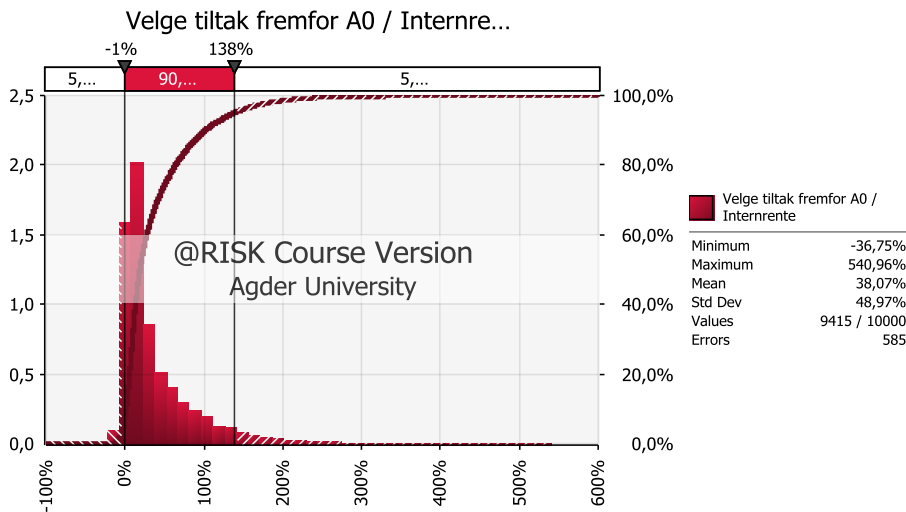
Figur 7-4: Resultatgraf fra simulering av besparelse ved å velge tiltak på Skråstadvarden



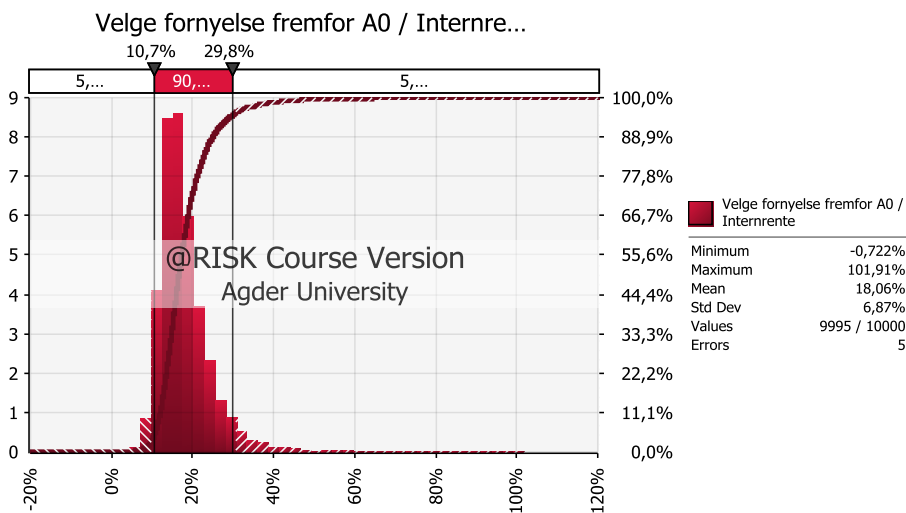
Figur 7-5: Resultatgraf fra simulering av besparelse ved å velge fornyelse på Skråstadvarden



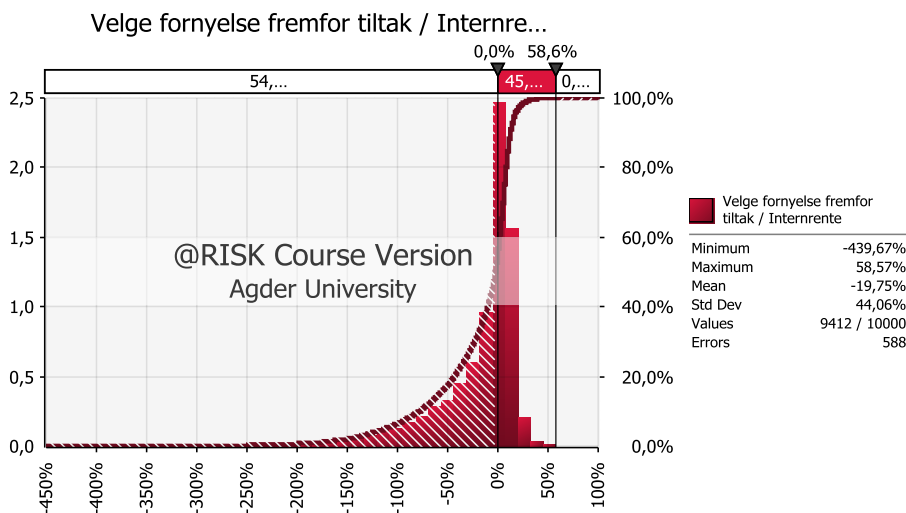
Figur 7-6: Kostnader spart ved å velge fornyelse fremfor tiltak



Figur 7-7: Monte Carlo-simulering av internrente ved valg av tiltak på Skråstadvarden



Figur 7-8: Monte Carlo-simulering av internrente ved valg av fornyelse på Skråstadvarden



Figur 7-9: Monte Carlo-simulering av internrentedifferanse ved å velge fornyelse fremfor tiltak på Skråstadvarden

Ser vi derimot på internrenten for de to alternativene har tiltaks-alternativet høyere forventet avkastning – 38 % – (se figur 7-7) enn fornyelsesalternativet – 18 % (se figur 7-8). Fornyelse har imidlertid langt lavere standardavvik, noe som fører til at tiltaksalternativet kun har ca. 55 % sannsynlighet for å gi en høyere avkastning enn fornyelse.

Grunnen til at tiltaksalternativet gir høyere forventet avkastning er lavere investeringskostnader enn for fornyelsesalternativet. Konsekvensene av feil på linjen er også relativt lave. Høyere reduksjon i feilsannsynlighet ved fornyelsesalternativet veier derfor ikke opp for den økte investeringskostnaden.

7.1.5 Trinn 4 – Oppsummering og beslutning

I trinn 4 skal resultatene fra kalkylen vurderes opp mot risikovurderingen og kvalitative faktorer for å foreta en endelig beslutning. Gitt at fornyelsesalternativet ga laveste kostander, kombinert med at dette alternativet reduserer risikoen i tilfredsstillende grad, vil anbefalingen være å fornye linjen.

Etter det vi kjenner til ble det valgt å bygge om linjen med lavspent hengekabel. Endelig beslutning er ikke tatt, men det vurderes blant annet en 400/1000 V-løsning. Denne beslutningen tas i ettertid av AE Nett. Kostnaden for dette alternativet vites ikke.

7.1.6 Observasjoner og erfaringer

Det ble observert at karaktersettingen ved bruk av PDA var betydelig lettere enn med ark. Det var meget lett å finne frem til riktig mastepunkt, og alle fullførte mastepunkt ble markert i kart. Til sammenligning viste det seg å være vanskelig å holde styr på de manuelle arkene. Det var særlig vanskelig å finne frem til et tidligere mastepunkt for å rette eventuelle feil. Et annet moment er også mengden ark som er nødvendig – totalt 19 ark måtte medbringes, og det hente ofte at disse rotet seg ut av hendene på brukeren. Det ble dog oppdaget at PDAen er sårbar for skader, og ulendt terreng kunne ha ført til skader på enheten om man skulle ha mistet denne. Med riktig beskyttelse skal ikke dette være noe problem. Alt i alt syntes det likevel å være en stor fordel å kunne føre inn karakterene digitalt.

Et annet moment som taler til fordel for den digitale løsningen er oppbevaringen og videre bruk av tilstandskarakterene. En enkel Excel-eksport var nok til å samle karakterene, mot behovet for manuell innføring for løsningen med ark. Det er også enklere å hente informasjonen fra den digitale løsningen opp igjen, da dette ligger lagret i en elektronisk database til forskjell fra et papirarkiv. Det er også mulig å knytte bilder fra befaringen direkte opp mot kontrollpunktene på PDAen.

Kalkylen ga resultater som syntes realistiske. Gitt at linjen var gammel og dårlig var sannsynligheten for feil i løpet av analyseperioden på 20 år svært høy. Dette ga høye KILE- og vedlikeholdskostnader i forhold til alternativet med ny linje.

Prosessen ble revidert i etterkant av testen. Det ble blant annet oppdaget at det er behov for klar definisjon av alternativer, og tilknyttet risiko, før eventuell kalkyle. Den reviderte prosessen ble mer logisk og var enklere å følge.

7.2 Referanseeksempel med innvirkning av endringer

Det ble tenkt frem en referanselinje for å vise hvordan kalkylen reagerer på andre realistiske inputvariabler. Den tenkte linjen forsyner en mye høyere og viktigere last, og har tilsvarende høyere KILE-kostnader og tap. Tilkoblede linjer som faller ut ved en feil har også høye KILE-kostnader. Dette gjør blant annet at feil på linjen medfører større konsekvenser enn for Skråstadvarden. Linjen antas å være fra 1990, med FeAl som linemateriale. Av den deskriptive statistikken i figur 5-3 og 5-5 kan vi se at dette er en typisk linje for AE Nett.

Tiltaket består av å bytte ut to isolatorsett (se tabell 7-4), samt installere en fjernstyrt bryter på linjeavgangen. Investeringen for isolatorskiftet er satt til 50 000,-. Installasjon av fjernstyrt bryter antas å koste 300 000,-. Den fjernstyrte bryteren antas å redusere utkoblingstiden av annen last til 30 sekunder. Fornyelse av linjen antas å koste 1,35 millioner, og det antas at fjernstyrt bryter ikke installeres.

Tabell 7-4: Tilstandskarakterer for imaginær linje – Trinn 2.0 Karaktertabell

| Før tiltak | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | Totalsum | Snittverdi | Vektning | Verdi |
|----------------------------------|-----------|-----------|-----------|----------|----------|------------|------------|--------------|-------------|
| Fornyelse - 02 Faseline | 2 | 14 | 9 | | | 25 | 2,28 | 30 % | 0,68 |
| Fornyelse - 03 Isolator | 3 | 20 | 2 | | | 25 | 1,96 | 10 % | 0,20 |
| Fornyelse - 04 Stolpe | 10 | 15 | | | | 25 | 1,60 | 35 % | 0,56 |
| Fornyelse - 05 Travers og Klaver | 5 | 3 | 17 | | | 25 | 2,48 | 15 % | 0,37 |
| Fornyelse - 06 Fundamentering | | 20 | 5 | | | 25 | 2,20 | 10 % | 0,22 |
| Totalsum | 20 | 72 | 33 | 0 | 0 | 125 | | 100 % | 2,03 |
| Etter tiltak | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | Totalsum | Snittverdi | Vektning | Verdi |
| Fornyelse - 02 Faseline | 2 | 14 | 9 | | | 25 | 2,28 | 30 % | 0,68 |
| Fornyelse - 03 Isolator | 5 | 20 | | | | 25 | 1,80 | 10 % | 0,18 |
| Fornyelse - 04 Stolpe | 10 | 15 | | | | 25 | 1,60 | 35 % | 0,56 |
| Fornyelse - 05 Travers og Klaver | 5 | 3 | 17 | | | 25 | 2,48 | 15 % | 0,37 |
| Fornyelse - 06 Fundamentering | | 20 | 5 | | | 25 | 2,20 | 10 % | 0,22 |
| Totalsum | 22 | 72 | 31 | 0 | 0 | 125 | | 100 % | 2,02 |

Tabell 7-5: Inngangsvariabler og resultat fra imaginært eksempel – Trinn 3.0 Inn- og utdata

| PARAMETERE | Verdi | Kommentar |
|-------------------------------|-----------|----------------------------|
| Analyseperiode | 30 | Maks 35 år |
| Diskonteringsrente | 6,56 % | |
| Forbruksvekst | 1 % | Årlig vekst i strømforbruk |
| Inflasjon | 2 % | Årlig vekst i konsumpriser |
| Antall kilometer linje | 2 | |
| Feilrettingskostnad (kr/time) | kr 1 000 | |
| Energisats (kr/kWh) | kr 0,50 | Sats for energitap i linje |
| Inspeksjon (kr/km) | kr 1 300 | |
| Befaring (kr/km) | kr 2 600 | |
| Materialkostnad per feil | kr 15 000 | |

| NÅVERDIER | Før tiltak (A0) | Etter tiltak (A1) | Fornyelse (A2) |
|----------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| NNV - Tap | kr 926 994 | kr 926 994 | kr 741 595 |
| NNV - KILE | kr 3 336 464 | kr 1 097 554 | kr 0 |
| NNV - Investeringer | kr 0 | kr 350 000 | kr 1 288 754 |
| NNV - Drift og vedlikehold | kr 165 141 | kr 149 902 | kr 50 271 |
| Totalt | kr 4 428 599 | kr 2 524 451 | kr 2 080 620 |

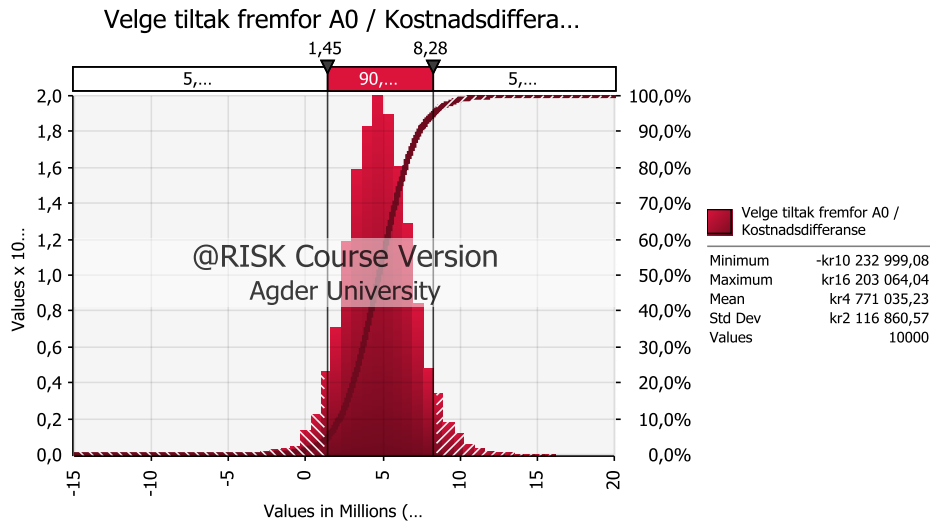
| RESULTAT | Kostnadsdifferanse | Internrente |
|--------------------------------|--------------------|-------------|
| Velge fornyelse fremfor A0 | kr 2 347 979 | 11,05 % |
| Velge tiltak fremfor A0 | kr 1 904 148 | 14,62 % |
| Velge fornyelse fremfor tiltak | kr 443 831 | -3,57 % |

Tabell 7-6: Inngangsvariabler fra imaginært eksempel – Trinn 3.0 Inn- og utdata

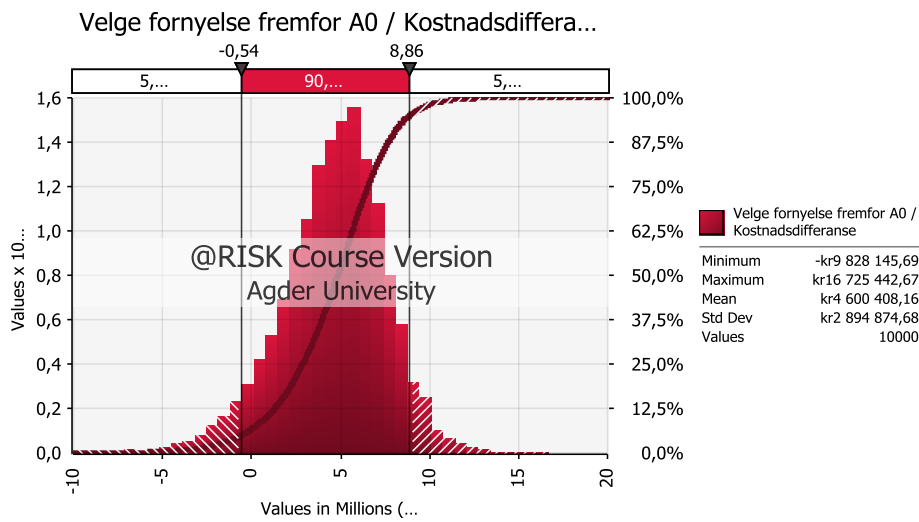
| | Før tiltak | Etter tiltak | Fornyelse |
|---|-------------------|-------------------|-------------------|
| INFORMASJON OM GAMMEL LINJE | | | |
| Byggeår | 1990 | 1990 | 2015 |
| Alder | 25 | 25 | 0 |
| Linetype (gammel) | FeAL/AL | FeAL/AL | |
| Stolpetype (gammel) | Kreosotimpregnert | Kreosotimpregnert | |
| Traverstype (gammel) | Tre | Tre | |
| Isolatortype (gammel) | Glass | Glass | |
| INFORMASJON OM NY LINJE | | | |
| Linetype (ny) | | BLL | BLL |
| Stolpetype (ny) | | Kreosotimpregnert | Kreosotimpregnert |
| Traverstype (ny) | | Aluminium | Aluminium |
| Isolatortype (ny) | | Kompositt | Kompositt |
| Antall nye linespenn | | 0 | 25 |
| Antall nye mastepunkt | | 0 | 25 |
| Antall nye traverser | | 0 | 25 |
| Antal nye isolatorsett | | 2 | 25 |
| DRIFT OG VEDLIKEHOLD | | | |
| Inspeksjonsintervall | 1 | 1 | 1 |
| Befaringsintervall | 5 | 5 | 5 |
| INVESTERINGER | | | |
| Investeringskostnad | | kr 350 000 | kr 1 350 000 |
| Økonomisk levetid (år) | | 20 | 35 |
| Restverdi etter analyseperiodens utløp | | kr - | kr 61 246 |
| Investering korrigert for restverdi | | kr 350 000 | kr 1 288 754 |
| Investeringskostnad per år | | kr 26 969 | kr 99 304 |
| KILE | | | |
| Avbruddstid per feil (min) | 245,35 | 245,35 | 245,35 |
| Tid fra feil til gjeninnkobling av andre linjer (min) | 30 | 0,5 | 30 |
| KILE-sats for alle linjer som faller ut | kr 700 000 | kr 700 000 | kr 700 000 |
| KILE-sats for denne linjen | kr 50 000 | kr 50 000 | kr 50 000 |
| TAP | | | |
| Energitap per år (kWh) | 100 000 | 100 000 | 80 000 |

Både tiltak og fornyelse gir betydelige besparelser sett opp mot nullalternativet. Kostnadsbesparelsen er på henholdsvis 4,77 millioner (se figur 7-11) og 4,6 millioner for tiltaket (se figur 7-12). Fornyelse har en sannsynlighet for positiv nåverdi på ca. 93 %, mot ca. 98 % for tiltak. Tiltaksalternativet har også et lavere standardavvik, som betyr mindre usikkerhet av resultatet.

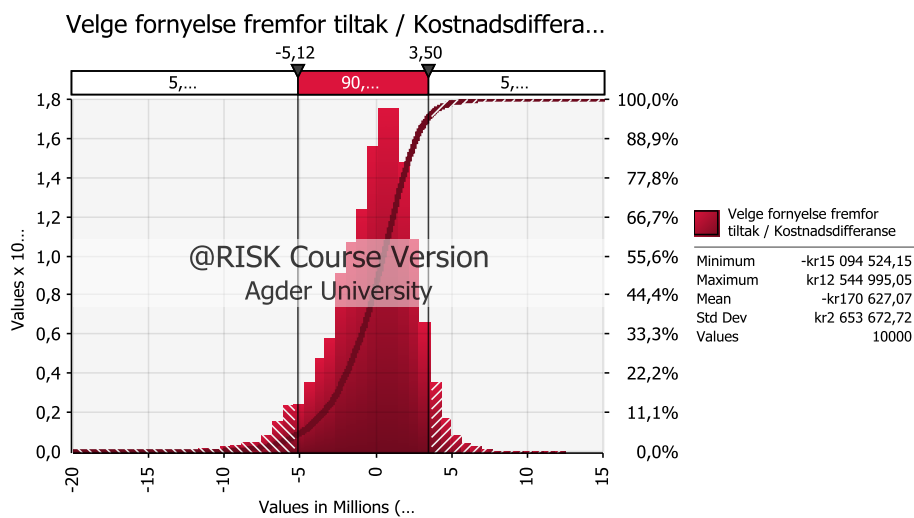
Sannsynligheten for at tiltak gir høyere kostnadsbesparelse enn fornyelse er ca. 55 %. Siden det er snakk om sannsynlighetsfordelinger er det likevel en mulighet for at fornyelse kan være mer lønnsomt. Dette kan vi se av figur 7-13.



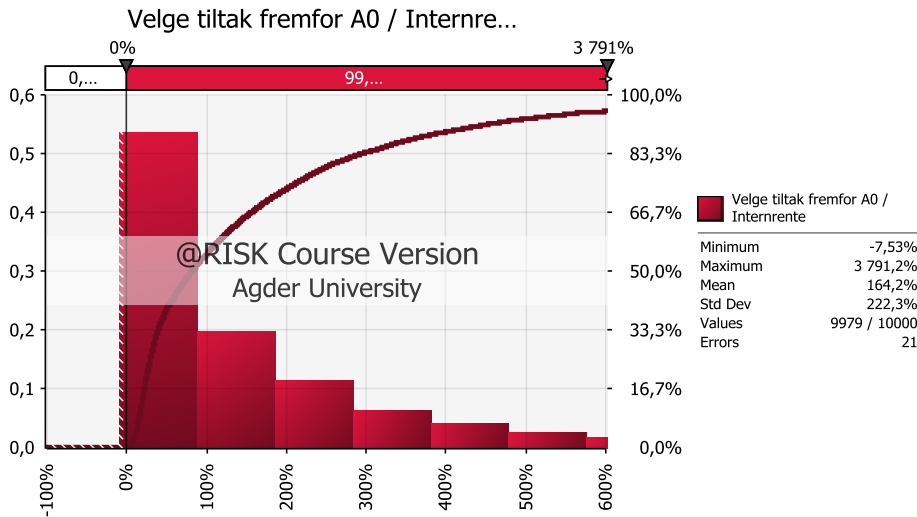
Figur 7-10: Resultatgraf @Risk fra referanseeksempel. Besparelse tiltak



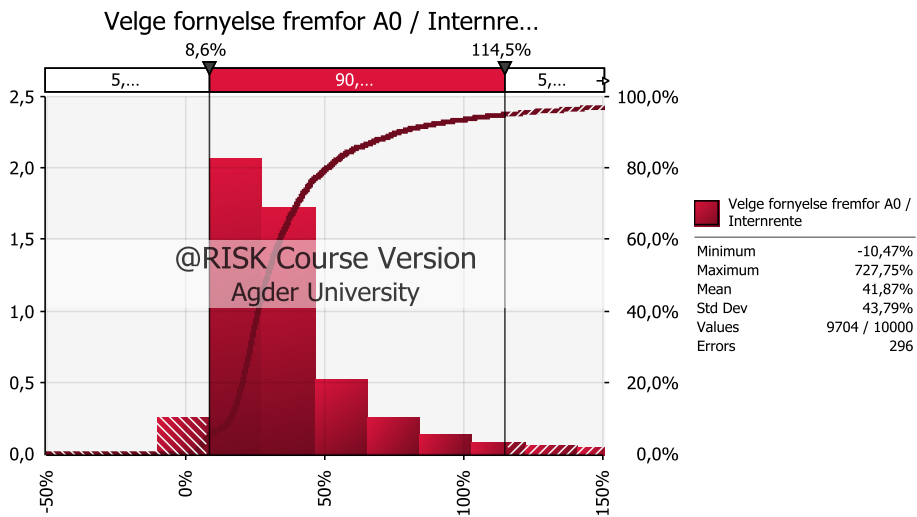
Figur 7-11: Resultatgraf @Risk fra referanseeksempel. Besparelse fornyelse



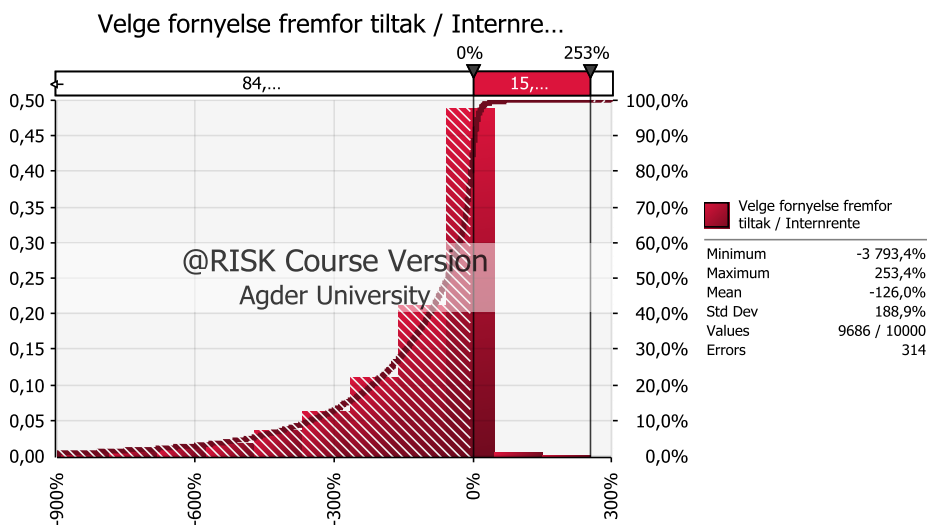
Figur 7-12: Besparelse for imaginær linje ved å velge fornyelse fremfor tiltak



Figur 7-13: Monte Carlo-simulering av internrente ved valg av tiltak på referanselinjen



Figur 7-14: Monte Carlo-simulering av internrente ved valg av fornyelse på referanselinjen



Figur 7-15: Monte Carlo-simulering av internrentedifferanse ved å velge fornyelse fremfor tiltak på Referanselinjen

Lønnsomheten av tiltaksalternativet har en høyere forventningsverdi – 164 % (figur 7-14) – enn fornyelsesalternativet – 42 % (figur 7-15). Vi ser også at sannsynligheten for at tiltaksalternativet gir høyere internrente enn fornyelse er ca. 85 % (figur 7-16).

Alternativet ved fornyelse tilbakestill alle komponenter til ny tilstand og reduserer så sannsynligheten for feil. Tiltaksalternativet reduserer konsekvensene ved feil, da KILE-kostnadene blir dramatisk redusert. De høye kostnadsbesparelsene er et resultat av de voldsomme konsekvensene ved feil på linjen. Det konsekvensreduserende alternativet får dermed høyest lønnsomhet da det reduserer risiko i tilsvarende grad som det sannsynlighetsreduserende alternativet, i tillegg til at tiltaket har lavere investeringskostnader.

Det har ikke blitt foretatt noen risikoanalyse av den tenkte linjen. Det er kun kalkylen som har blitt testet ut.

Kapittel 8: Diskusjon

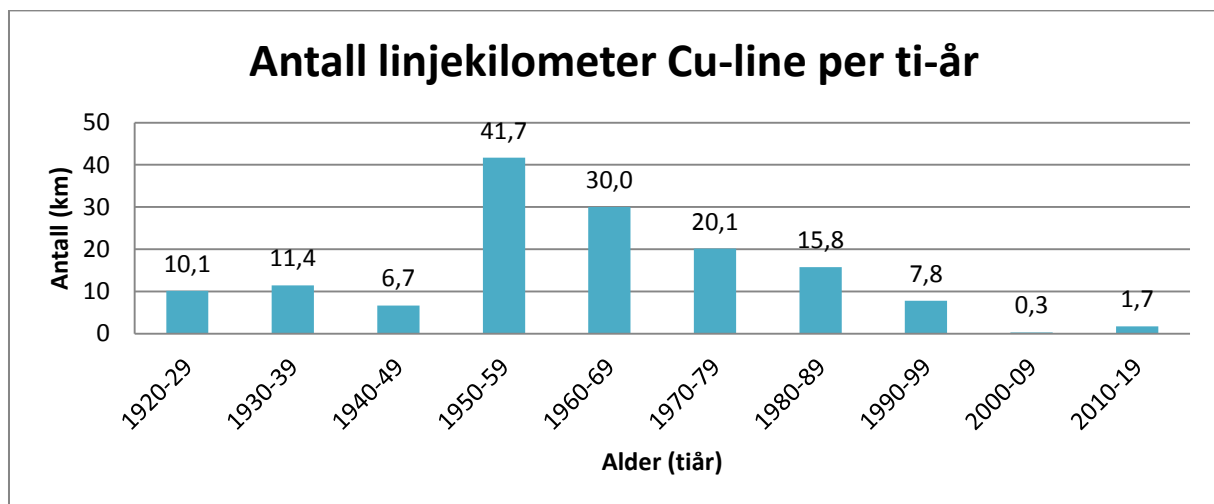
I dette kapitlet diskuteres metodene, løsningene og resultatene i oppgaven. Det vil omhandle bruk av deskriptiv statistikk i kapittel 5, løsningsbeskrivelsen i kapittel 6, og evalueringen i kapittel 7.

8.1 Er det hensiktsmessig å benytte deskriptiv statistikk?

Det ble utarbeidet deskriptiv statistikk som gir en oversikt over eksisterende anlegg med geografisk beliggenhet, aldersfordeling, materialfordeling og svikterfaring, basert på tallmateriale fra AE Nett. Denne statistikken gir en god oversikt over situasjonen man befinner seg i, og kan benyttes som en del av beslutningsgrunnlaget i forbindelse med fornyelsesvurdering.

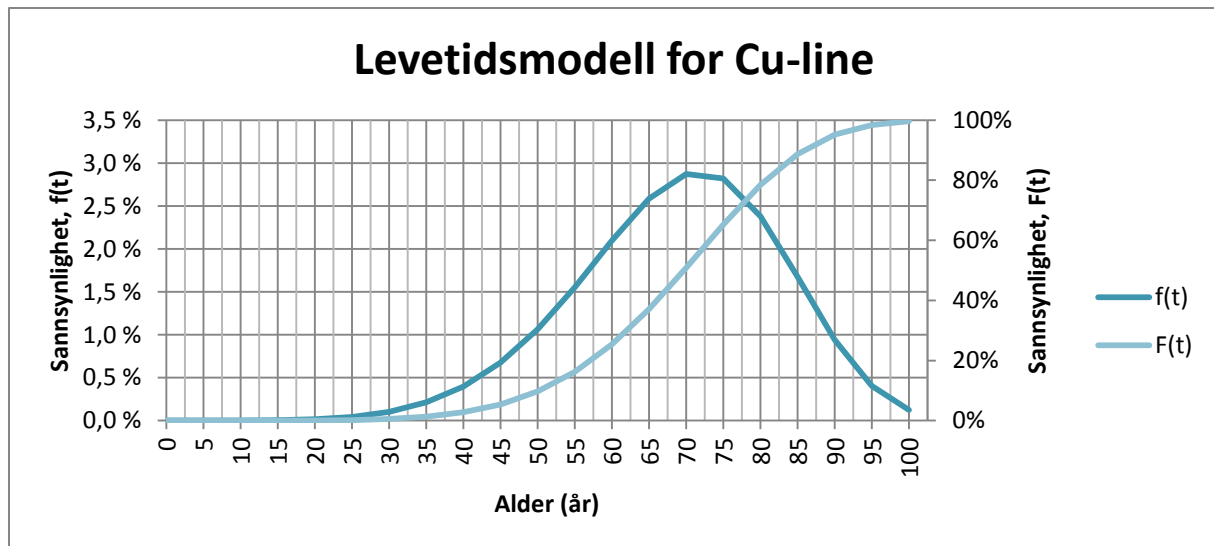
Vi kan se av statistikken at det var en investeringsbølge på 70-, 80- og tidlig 90-tallet. Dette vil føre til at en stor del av anleggene vil nå sin forventede tekniske levetid om 20 til 30 år (figur 5.1 og 5.3 i kapittel 5), og at det sannsynligvis vil kreve store investeringer og vedlikeholdsressurser i det i kommende intervallet. Dette er også med på å øke behovet for gode vedlikeholdsmetoder.

Ved å koble levetidsmodellene opp mot aldersfordelingen kan man forutsi nødvendig utskiftning for hele konsesjonsområdet til AE Nett. Dette kan være nyttig i forbindelse med langtidsplanlegging og budsjettering.



Figur 8-1: Aldersfordeling for kobber-line (Cu)

Vi ser for eksempel at kobberlinene får en topp på sannsynlighetsfordelingen for feil rundt 70 år (figur 8-2). Siden en størsteparten av kobberlinene ble bygget på 50- og 60-tallet (figur 8-1), blir det sannsynligvis mange slitasjefeil mellom 2020 og 2040 for slike liner. Dette er gitt at det ikke gjennomføres tiltak, og at linene ikke skiftes ut preventivt.



Figur 8-2: Sviktsannsynligheter for kobber-line (Cu)

Det ble vist i oppgaven at det var hensiktsmessig å dele sviktmekanismer opp i tilfeldige og slitasjerelaterte feil (kapittel 6.1). Ved å benytte denne oppdelingen i fremtiden vil AE Nett kunne danne seg et bedre bilde over sviktintensiteter og nødvendige tiltak.

Statistikken er imidlertid begrenset, da datagrunnlaget ikke er optimalt. Blant annet finnes det data kun for mastepunkt og line/kabel, og ikke for resten av de aktuelle komponentene. Det er derfor nødvendig å gjøre anslag for resten av luftnettes komponenter.

8.2 Har Offshore-bransjen vedlikeholdspraksis som kan overføres til nettbransjen?

Offshore-bransjen har utviklet gode verktøy for vedlikeholdsplanlegging. Metodene og teorien er godt utprøvd og det ligger grundig forskning til grunn. I forbindelse med overførbarhet fra offshore-bransjen til nettbransjen, kan det stilles spørsmål til hvorvidt dette er mulig og effektivt.

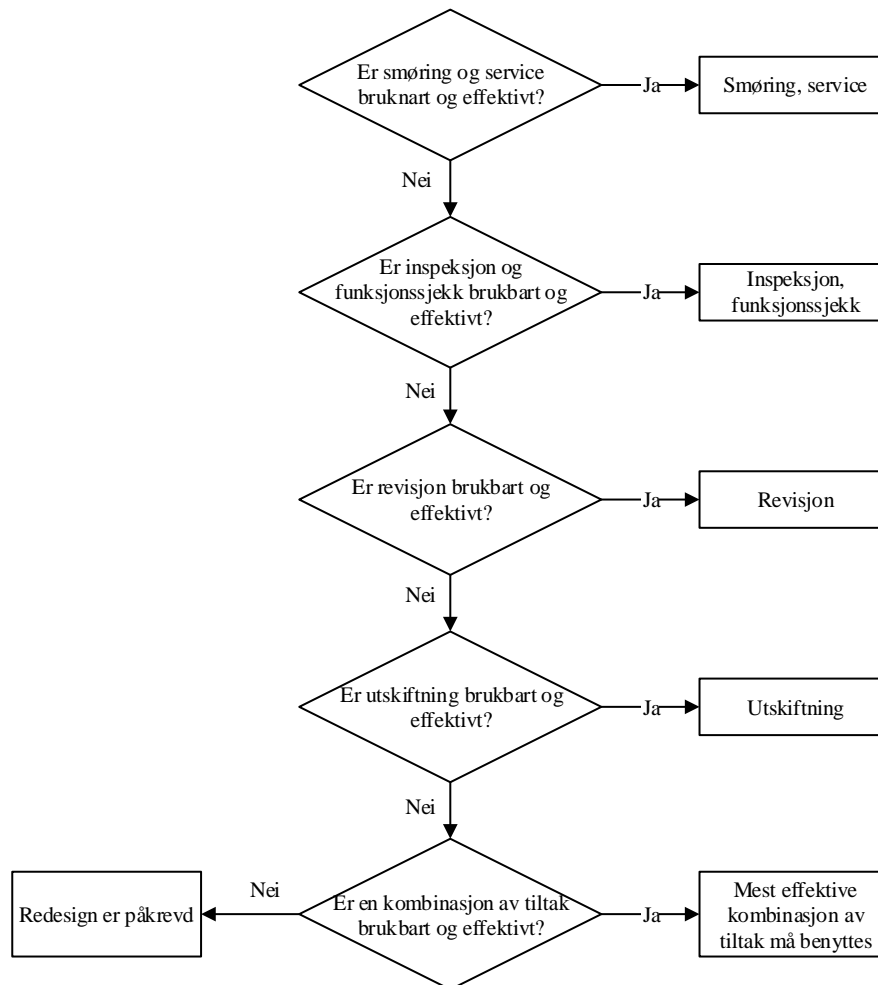
Risikoverktøyene og metodene som anvendes i offshore-bransjen krever stor grad av systematikk, detaljgrad og omfattende databaser. I tillegg er drift konsentrert innenfor et mindre område kontra et nettselskap som i de fleste tilfeller har ansvar for et stort konsesjonsområde. Overføring og implementering kan muligens være for krevende og kostbart.

8.2.1 Pålitelighetsbasert vedlikehold (RCM)

Fornyelsesvurderingsprosessen som oppgaven presenterer tar utgangspunkt i en RCM-prosess. RCM er et systematisk analyse-verktøy som ved bruk av logiske beslutningsdiagrammer skal fastsette nødvendige preventive vedlikeholdstiltak og et tilhørende tidsintervall. RCM-prosessen inkluderer også risikoanalyser kjent som FMECA og/ eller HAZOP.

Ved å innføre risikoanalyse i prosjekteringsfasen av nye anlegg vil RCM-prosessen lettere kunne anvendes for å forbedre fremtidig vedlikeholdsplanlegging. Hensikten er da å redusere vedlikeholdskostnadene og maksimere vedlikeholdseffekten. Metoden er godt tatt i mot i andre bransjer, og ettersom vedlikeholdspraksis er et viktig tema for AE Nett og nettbransjen, kan denne metoden tenkes overført.

RCM-metodikken vi presenterer legger i større grad vekt på kombinasjonen av risiko og økonomiske vurderingspunkter, enn hva AE Nett gjør i dag. Et viktig moment som følger med anbefalingen av en slik metodikk er bruken av en systematisk vedlikeholdsmeny. Se figur 8-3. Menyen skal benyttes for å skreddersy et preventivt vedlikeholdsprogram for en enhet. Det er viktig at hver enkelt feilmekanisme gjennomgås, da ulike mekanismer krever ulike tiltak. Innføring av en slik metodikk vil være et stort sprang for AE Nett, da det ikke har blitt benyttet slike metoder før. Dette stiller imidlertid store krav til pålitelige sviktdatabaser (se diskusjon om bruk av sviktintensitet og sviktdatabaser). En slik implementering kan føre til at AE Nett kan ta bedre beslutninger omkring fornyelse og vedlikehold.



Figur 8-3: Oversikt over vedlikeholdsmeny til RCM (trinn 2)

Strukturen i vedlikeholdsmenyen søker å finne det rimeligste og mest effektive vedlikeholdstiltaket ved å plassere de enkleste vedlikeholdstiltakene øverst i menyen. Hvis det viser seg at ingen av de enkle tiltakene er brukbare og effektive nok, tvinges brukeren til å gjennomføre et redesigntiltak for å tilfredsstille behovet for risikoreduksjon. Dette kan være nyttig da man unngår å neglisjere enheter. For eksempel kan det tenkes at en luftlinje er så dårlig at enkle tiltak ikke er brukbare og effektive i å redusere risiko for HMS og avbrudd, og at det blir nødvendig med fornyelse av linjen. Man har da likevel gjennomgått enklere alternativer, slik at en fornyelse er godt begrunnet.

8.2.2 Komponentidentifikasjon

For AE Nett ser vi store forbedringsmuligheter når det kommer til komponentidentifikasjon. Selv om det per i dag finnes store mengder data og informasjon om ulike komponenter, finnes det ikke en systematisk oversikt over hver enkelt komponent i nettet, eller muligheter for å identifisere disse. Dette medfører vanskeligheter i å utforme en total oversikt over blant annet hvor mange enheter som finnes av hver komponent, hvilken spesifikk type det er eller alderen til de ulike komponentene etc. Det skal nevnes at AE Nett har gode oversikter over enkelte komponenter, som blant annet mastepunkt og line, hvor blant annet informasjon som objektnummer, avdeling, byggeår, merketype, spenningsnivå er beskrevet i detalj. Se kapittel 5.

For at fornyelsesprosessen skal fungere optimalt, må det legges til grunn en pålitelig database som inneholder all den informasjon, blant annet driftshistorikk, komponentidentifikasjon og feilstatistikk, som AE Nett behøver for å gjennomføre gode fornyelses-vurderinger og vedlikeholdsbeslutninger. Denne databasen finnes til dels allerede, men det er viktig at denne forbedres, blant annet med høyere grad av komponentidentifikasjon. Det er dog ikke å forvente at datagrunnlaget for en helt ny metodikk finnes. RCM-metoden er et nytt konsept for AE Nett, og det er derfor å forvente at det trengs endringer og tilpasninger.

Driftshistorikken vil gi informasjon om blant annet hvilke utskiftninger som har blitt foretatt på linjen, når utskiftningene ble foretatt, ombygginger etc. Slik informasjon vil kunne bidra i den totale vurderingen av linjen.

En systematisk komponentidentifikasjon vil forenkle arbeidet med å indentifisere komponentene tilhørende linjen. Databasen bør for eksempel inneholde tegninger, fabrikkasjonsår, byggeår, produsent, type material ol. En slik database vil bidra til å opprettholde en systematisk oversikt over hvilke komponenter som er satt i drift i nettet, og bør samtidig kobles opp mot feilstatikken.

Utfordringen med komponentidentifikasjon påvirker også feilregistreringen. Feilstatistikk er kritisk i forbindelse med fornyelsesvurderinger. Feilstatistikken gir informasjon om blant annet KILE-kostander pga. feil på linjen, hvilke type feil som oppstår, samt hvilke type komponenter som havarerer. Det er viktig med god komponentidentifikasjon for å kunne plassere feilene riktig i nettet, og for å velge tiltak på utsatte komponenter.

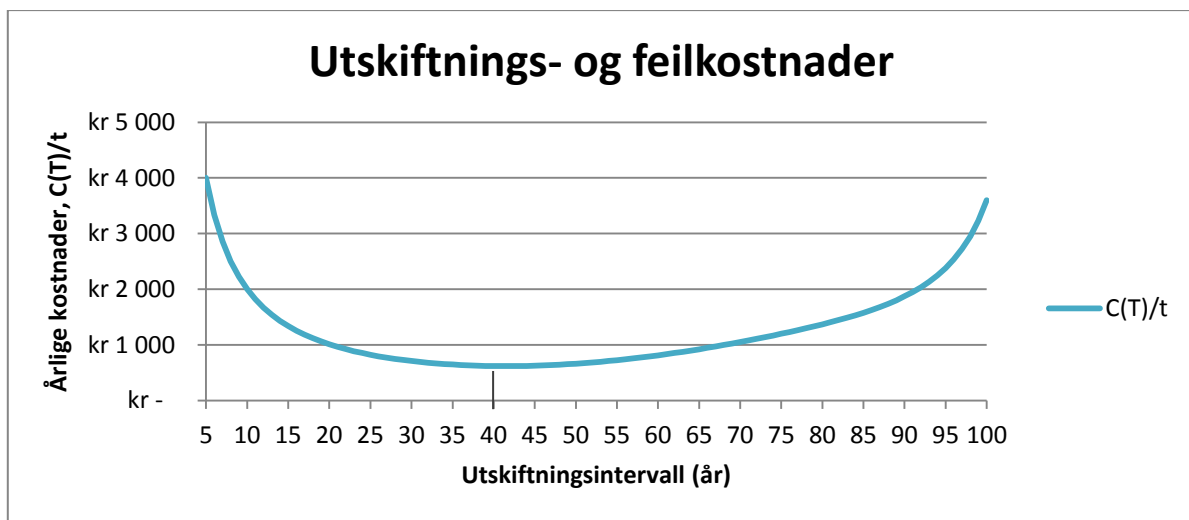
Ved bruk av FASIT kan AE Nett dokumentere og fremvise alle feilsituasjoner. Utfordringen med de historiske dataene består i hovedsak av kontrollpunkter hvor det ikke er registrert essensiell pålitelighetsinformasjon, slik som fabrikkasjonsår, byggeår og objektnummer. Uten denne informasjonen er ikke feilstatikken brukbar til utvikling av blant annet levetidsmodeller, og det må gjøres anslag og estimeringer som medfører mindre pålitelige løsninger og konklusjoner. Det trengs et omfattende datagrunnlag, og det er derfor hensiktsmessig at hele nettbransjen samarbeider for å skaffe gode nok data.

8.2.3 Sviktmekanismer og sviktintensitet

Et av hovedmålene til AE Nett er å få «mer for mindre». Se kapittel 3.1. Man ønsker å øke levetiden på eksisterende anlegg, og styre investeringer og vedlikehold dit hvor det har størst effekt. Et viktig delmål, gitt ønske om å redusere kostnader og bruke kapitalen riktig, er å redusere kapitalbinding i form av lager. Et verktøy i denne sammenheng er beregning av nødvendig lagerstørrelse ut fra

ønsket pålitelighet og beregnet sviktintensitet. Det er lite hensiktsmessig å forlenge levetiden på anleggene om man lar kostnadsbesparingene bli tatt igjen på lagerbeholdning.

Vi har vist at sviktintensiteten oppfører seg ulik for slitasje og tilfeldige feil. For slitasje er det mulig å forutsi feilingstidspunkt, og det behøves derfor ikke lagerbinding. Her kan man istedenfor benytte metoder fra logistikkteorien, slik som Just In Time (JIT) og Lean. Det har også blitt forsøkt å beregne et optimalt utskiftningsintervall for en slitasjeutsatt komponent. Dette ga et sannsynlig utskiftningsresultat på 40 år. Utskiftningsstidspunktet kommer før teknisk levetid er nådd, da feilkostnadene ofte er høye og lavere preventive utskiftningskostnader er å foretrekke (se kapittel 6.1.5 og figur 8-4).



Figur 8-4: Utskiftnings- og feilkostnader per tidsenhet for en stolpe, ved ulike utskiftningsintervall

Beregningen av optimalt utskiftningsintervall for en kobber-line syntes å gi realistiske resultater. Et utskiftningsstidspunkt som kommer tidligere enn enhetens tekniske levetid er å forvente, da feil på enheten medfører høyere kostnader enn ved preventiv utskiftningsintervall. Det syntes derfor å være mulig å benytte slike beregninger for å sette et optimalt utskiftningsintervall. Disse intervallene burde naturligvis tilpasses den enkelte linje da feilkostnadene vil variere.

Det er kun for de tilfeldige feilene at beredskapslager er aktuelt. Ved å beregne sviktintensiteten for tilfeldige hendelser kan lagerbindingen derfor optimaliseres. AE Nett har et spesielt samfunnsoppdrag, og det er svært nødvendig med høy grad av beredskap for å kunne rette eventuelle feilsituasjoner. Det bør derfor diskuteres om det er hensiktsmessig med utregning av optimal lagerstørrelse. Et viktig moment er at stormer fører til en dramatisk økning i antall feil i løpet av et kort tidsrom. Det kan derfor være nødvendig for AE Nett å bygge opp store lagerbeholdninger for å beskytte seg ved slike situasjoner.

Det ble foretatt en beredskapslagerberegning. Resultatet ble 8 kilometer line, 1 stolpe, 2 isolatorer og 0 traverser. Verdiene er urealistiske lave. Dette kan blant annet vær fordi feilsituasjonen kun registrerer antatt utløsende komponent, og ikke alle komponenter som blir berørt av feilen. Beregningene baserer seg på registrerte tilfeldige feil hos AE Nett ved bruk av Poisson-rekker. Da tallene ikke virker realistiske, og kravene til beredskap er meget høye i AE Netts tilfelle, vil det ikke være hensiktsmessig å benytte denne metoden for å beregne lagerbeholdning.

Sett i lys av offshore-bransjens tankesett for systematisk risikovurdering og vedlikeholdsplanlegging, kan det være hensiktsmessig å overføre og implementere vedlikeholds-filosofien fra offshore-bransjen til nettbransjen. Et nettselskap består av store antall anlegg og komponenter. Dette stiller store krav til systematikk, slik det også gjør for oljeselskapene.

8.3 Er det hensiktsmessig å benytte tilstandskarakterer?

Bruken av tilstandskarakterene har en dobbel funksjon. For det første har man mulighet til å indikere tilstanden til en linje ved bruk av en tallverdi, noe som gjør det lettere å kommunisere tilstanden. Den andre funksjonen er en parameter som kan benyttes for oppdatering av forventet restlevetid. Begge disse funksjonene har blitt demonstrert i denne oppgaven (se kapittel 6.3). Bruken av karakterer er en enkel metode for å indikere tilstand, da det er lettere å kommunisere i store kvanta enn direkte beskrivelser av hver enkelt komponent på en linje.

Det er også noen utfordringer som oppstår ved bruk av tilstandskarakterer. Dette inkluderer blant annet definisjon av grensene til karakterene; hvordan ulike komponenter med ulike slitasjemekanismer skal grupperes sammen; måling av tilstanden; objektive definisjoner av tilstandsverdiene etc.

Pålitelighetsgrensene er ikke basert på et kostnadskriterium. Disse er satt ved skjønn, i samarbeid med AE Nett, og må testes og videreutvikles om de skal benyttes. Pålitelighet og tilsvarende tilstandskarakterer for en komponent kan sees i tabell 8-1.

Tabell 8-1: Eksempel på sviktintensitet, pålitelighet og tilstandskarakterer for en kreosotimpregnert stolpe

| Mast - Kreosotimpregnert | | | |
|--------------------------|--------------|--------|-------------------|
| Alder | $\lambda(t)$ | $R(t)$ | Tilstandskarakter |
| 0 | 0,00 | 100 % | 1 |
| 5 | 0,00 | 100 % | 1 |
| 10 | 0,00 | 100 % | 1 |
| 15 | 0,00 | 100 % | 1 |
| 20 | 0,00 | 100 % | 1 |
| 25 | 0,00 | 99 % | 2 |
| 30 | 0,00 | 98 % | 2 |
| 35 | 0,00 | 97 % | 2 |
| 40 | 0,01 | 94 % | 3 |
| 45 | 0,01 | 90 % | 3 |
| 50 | 0,02 | 85 % | 3 |
| 55 | 0,02 | 78 % | 4 |
| 60 | 0,03 | 68 % | 4 |
| 65 | 0,04 | 58 % | 5 |
| 70 | 0,05 | 46 % | 5 |
| 75 | 0,07 | 34 % | 5 |
| 80 | 0,08 | 23 % | 5 |
| 85 | 0,11 | 15 % | 5 |
| 90 | 0,13 | 8 % | 5 |
| 95 | 0,16 | 4 % | 5 |
| 100 | 0,19 | 2 % | 5 |

Ved å øke antall mulige tilstandskarakterer, for eksempel ved å strekke intervallet fra én til ti, vil man kunne oppnå mer detaljerte tilstandsbeskrivelser. Et høyere antall karakterer fører imidlertid til brukerutfordringer. Flere karakterer vil blant annet føre til mer komplisert karaktergivning, i tillegg til at karaktergivningen kan bli mindre nøyaktig da grensene ligger tettere. Det kan også vise seg u hensiktsmessig å bruke et stort karakterintervall, da ulike brukere av systemet kan ende opp med å gi forskjellige karakterer til samme tilstand, pga. små forskjeller mellom karakterene og unøyaktige målemetoder. Det blir også komplisert å definere en høy detaljeringsgrad på tvers av komponenttyper.

Med dette i tankene ble det foretatt et valg om å begrense antall karakterer til fem, for å oppnå en balanse mellom detaljering og brukervennlighet. Her defineres ytterpunktene klart som beste og dårligste tilstand, og de tre mellomkarakterene definerer graderinger mellom disse. Denne karaktergraderingen viste seg å være praktisk under testingen av løsningen, og etter litt øvelse var det lett å plassere tilstandskarakterene på de ulike komponentene. Se kapittel 7.

Det er ikke gitt at denne løsningen er optimal eller standardisert med resten av bransjen. Blant annet benytter Energi Norges SysLife-prosjekt et intervall fra én til fem, hvor fem definerer feil på komponent. I vår oppdeling er karakter fem definert som stadiet før feil. Ved denne tilstanden er dog komponenten så dårlig at en den ikke vil kunne tåle dimensjonerende overbelastninger, selv om den utfører sin grunnfunksjon. Det kan derfor argumenteres for at komponenten har en «feil» da den ikke tilfredsstillt krav til belastning.

For å skape en felles forståelse og definisjon av hvilke tilstander som fører til hvilke tilstandskarakterer, ble det utviklet en brukerhåndbok med definisjoner (se vedlegg B). Denne viste seg å være praktisk, og det ble lettere å skape enighet om karakterene når man kunne vise til en objektiv definisjon (se kapittel 7). En utfordring er å skape klare, målbare grenser mellom karakterene. Enkelte av beskrivelsene, slik som «noe råte» eller «noe rust», kan i tillegg være uklare. Brukerhåndboken burde derfor oppdateres med klare målemetoder og grenser for alle karakterene, gjerne supplert med illustrasjoner og bilder, for å oppnå en mer konsis karaktergivning blant brukerne av systemet.

Det oppfattes som at tilstandskarakterene i denne oppgaven er en forbedring fra karakterene som ble benyttet i forrige versjon. Blant annet har vårt system definert tilstander til hver enkelt karakter, der hvor AE Nett hadde en generisk liste for hver komponent, og det var opp til befarende å sette sin subjektive vurdering. Se vedlegg N.

8.4 Er det hensiktsmessig å benytte levetidsmodeller?

Levetidsmodellene er basert på Weibull-fordelinger av sannsynlighet for feil som en funksjon av tid. For at modellene skal være nøyaktige er det viktig med gode bakgrunnsdata som reflekterer virkeligheten på en god måte. I denne rapporten er ikke nødvendigvis dette tilfellet. Weibull-fordelingene er basert på et begrenset datasett med få datapunkter, som inneholder anslag fra eksperter istedenfor virkelige levetidsdata (se vedlegg D). For å oppnå gode modeller er det derfor nødvendig med grundige undersøkelser og god datainnsamling av teknisk levetid for komponentene som vurderes.

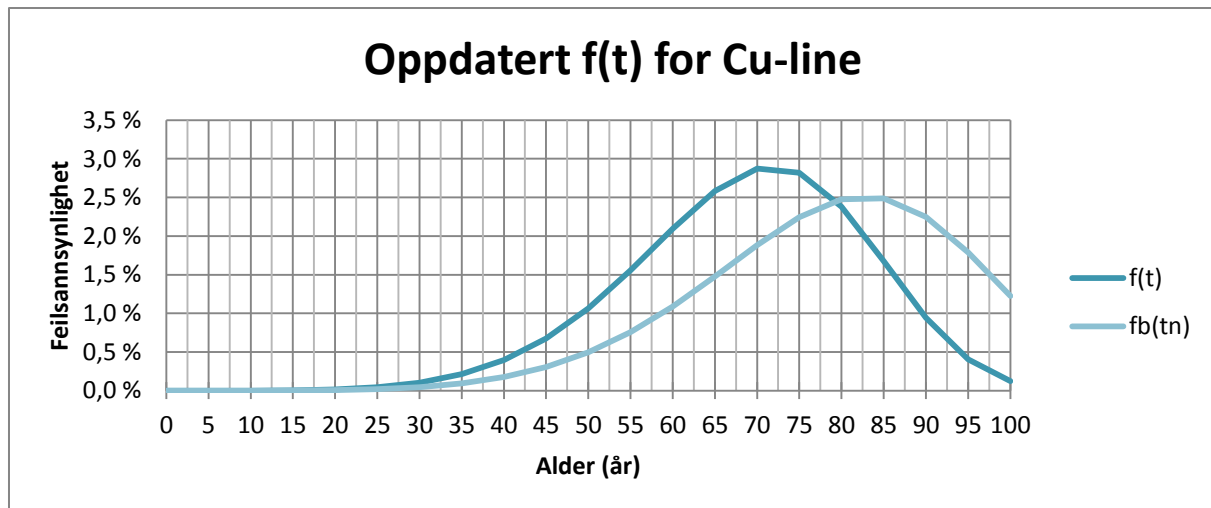
Det viste seg likevel at bruken av levetidsmodeller var hensiktsmessig. Ved å modellere disse stokastisk ble usikkerheten av anslagene inkludert i beregningene. Dette er nyttig, da det viser at resultatene fra beregningene ikke er gitt, men at de istedenfor har ulike sannsynligheter for å inntreffe. Dette reflekterer risiko, og viser at beregningene kun er forutsigelser, ikke sannheter.

Det viste seg også at bruken av tilstandskarakterer for matematisk oppdatering av forventet restlevetid var svært nyttig (figur 8-5). For en nåverdiberegning er gunstig å utsette feiling til et senere tidspunkt, da et beløp i fremtiden er mindre verdt enn et tilsvarende beløp i dag, fordi man kan oppnå alternativavkastning på kapitalen. Utsatt feiling som følge av vedlikehold vil derfor bidra til at man kan benytte feilrettingskostnadene på andre avkastningsgivende aktiva.

Weibull-modellene blir oppdatert med tilstandsinformasjon. En komponent som har blitt utsatt for mindre slitasje enn den opprinnelige modellen vil derfor få en lengre forventet restlevetid enn det det initiale anslaget skulle tilsi. Dette regner vi som en sannsynlig tilnærming til virkeligheten, da en komponent med lav historisk slitasje kan forventes å leve lengre enn komponenter med normal eller høy slitasje. Eksempel på oppdatert pålitelighet og tilstandskarakterer kan sees i tabell 8-2.

Tabell 8-2: Oppdatert pålitelighet og tilstandskarakterer for en kobberline

| Linje - CU | | | | | | | |
|------------|--------------|---------------|---------------|--------------|--------------|----------|----------|
| Alder | $\lambda(t)$ | R(t) | $R_b(t_n)$ | f(t) | $f_b(t_n)$ | Antatt | Virkelig |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| 30 | 0,00 | 99,5 % | 99,8 % | 0,1 % | 0,0 % | 1 | 1 |
| 35 | 0,00 | 98,7 % | 99,4 % | 0,2 % | 0,1 % | 2 | 1 |
| 40 | 0,00 | 97,2 % | 98,8 % | 0,4 % | 0,2 % | 2 | 2 |
| 45 | 0,01 | 94,6 % | 97,6 % | 0,7 % | 0,3 % | 3 | 2 |
| 50 | 0,01 | 90,3 % | 95,6 % | 1,1 % | 0,5 % | 3 | 2 |
| 55 | 0,02 | 83,8 % | 92,5 % | 1,6 % | 0,8 % | 3 | 3 |
| 60 | 0,03 | 74,6 % | 87,9 % | 2,1 % | 1,1 % | 4 | 3 |
| 65 | 0,04 | 62,9 % | 81,5 % | 2,6 % | 1,5 % | 4 | 3 |
| 70 | 0,06 | 49,1 % | 73,1 % | 2,9 % | 1,9 % | 5 | 4 |
| 75 | 0,08 | 34,7 % | 62,8 % | 2,8 % | 2,2 % | 5 | 4 |
| 80 | 0,11 | 21,6 % | 50,9 % | 2,4 % | 2,5 % | 5 | 4 |
| 85 | 0,15 | 11,4 % | 38,4 % | 1,7 % | 2,5 % | 5 | 5 |
| 90 | 0,19 | 4,9 % | 26,4 % | 0,9 % | 2,2 % | 5 | 5 |
| 95 | 0,25 | 1,6 % | 16,3 % | 0,4 % | 1,8 % | 5 | 5 |
| 100 | 0,32 | 0,4 % | 8,7 % | 0,1 % | 1,2 % | 5 | 5 |



Figur 8-5: Opprinnelig og oppdatert stokastisk modell for kobber-line (Cu)

Et forslag til forbedring kan være å inkludere flere parametere i levetidsmodellen. For eksempel kan man ta hensyn til grunnforhold, klimatiske forhold, belastning etc. Dette vil føre til at modellen blir mer nøyaktig, da anslaget for teknisk levetid vil variere med forhold som kan påvirke slitasjen. Det må selvsagt foretas en avveining for å bestemme en hensiktsmessig detaljeringsgrad, slik at modellens brukbarhet ikke forsvinner i kompleksiteten.

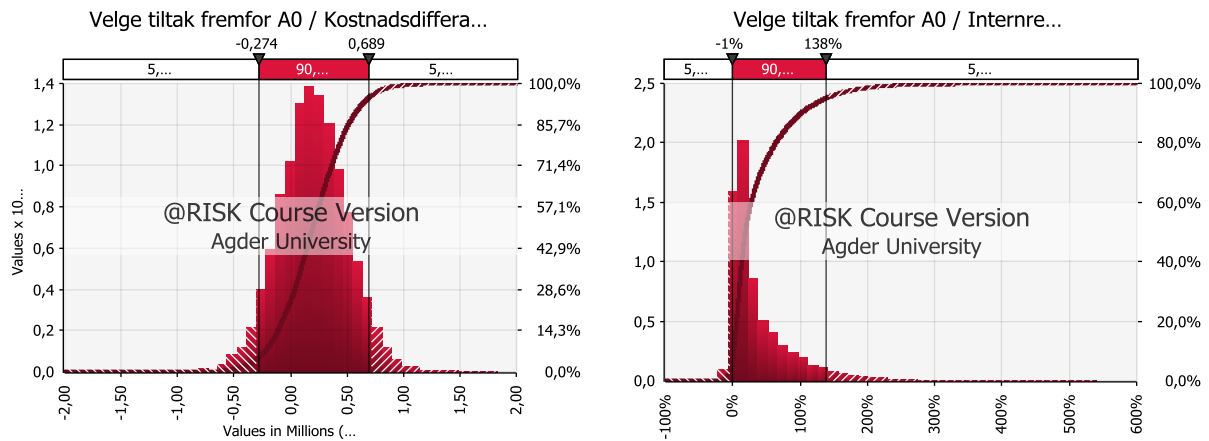
Utover dette burde AE Nett samle inn levetidsdata for komponenter. Dette kan gjøres ved å registrere komponentens driftstid ved feiling. For eksempel kan man registrere idriftsettelsesdato på komponenten som feiler, slik at man enkelt kan regne seg frem til driftstid. Datagrunnlaget for levetidsmodellene vil bli bedre da tallene representerer faktiske hendelser. Her er det igjen viktig at levetidsmodellene kun baseres på slitasjefeil, da tilfeldige feil ikke er en funksjon av tid, og er irrelevante for modellen.

Avbruddstiden ble også modellert som en stokastisk modell. Dette ble gjort fordi det antas at feilutbedringstiden ikke er konstant. Det kan dog diskuteres om denne modelleringen bør forbedres. Modelleringen av avbruddstiden er basert på avbruddsdata for hele AE Netts konsesjonsområde, og en del av variasjonen i feilrettingstid skyldes sannsynligvis ulike avstander til montører og utstyr, ulikt terreng, materialtype etc. Dette er imidlertid informasjon som er kjent på analysetidspunktet, for den spesifikke linjen. Det bør derfor vurderes om modellene bør baseres på data for linjer med like forutsetninger, eller om reparasjonstiden settes som en deterministisk variabel. Dette ble ikke foretatt i denne oppgaven da det ble ansett som for arbeidskrevende. Det er likevel et viktig moment å bringe videre.

8.5 Er det hensiktsmessig å benytte kost-nytte-analyse (CBA) for alternativvurderinger?

Kost-nytte-analysen benytter forskjell i sannsynligheter og kostnader mellom to alternativer for å beregne det mest lønnsomme alternativet. Effekten av et tiltak kan føre til reduksjon i sannsynlighet for en hendelse eller konsekvensen av en hendelse, og tiltaket har en kostnad forbundet ved seg. Om effekten av tiltaket overstiger kostnaden er tiltaket lønnsomt.

I rapporten ble både en reell og en referanselinje analysert (se kapittel 7). Den reelle linjen som ble analysert var gammel og dårlig. Det var derfor høye sviktsannsynligheter i nær fremtid for komponentene på linjen. Kombinert med høye avbruddskostnader på tilknyttede linjer førte dette til at både tiltak og fornyelse ble vurdert som lønnsomt, men at tiltak ga høyere internrente. Standardavviket var imidlertid stort, og sannsynligheten for høyere lønnsomhet ved tiltak enn ved fornyelse var kun 55 % (figur 8-6). Resultatene fra referanseeksperimentet ga sammenlignbare resultater, med tydelig skille på konsekvens- og sannsynlighetsreducerende tiltak.



Figur 8-6: Resultatgrafer fra kost-nytte-analyse av avgrensning Skråstadvarden

Målet med kost-nytte-analysen er å finne alternativet som gir de laveste totale kostnadene. En slik analyse vil gi det samme resultatet, enten man inkluderer eller ekskluderer kostnader som er like for alle alternativene. Det kan diskuteres om slike kostnader bør inkluderes, for å vise hva de totale kostnadene blir ved å velge ett alternativ – for eksempel hva de totale kostnadene for å la linjen stå urørt vil være. Dette er imidlertid utenfor oppgavens hensikt, og vi har derfor valgt å ekskludere slike kostnader.

Det er viktig å nevne at den økonomiske analysen ikke er dyp fra et finansielt perspektiv. Det tas ikke hensyn til avskrivninger, skattemessige justeringer etc. Analysen benytter en nåverdiregning for å gi et mest mulig korrekt bilde av hvordan de ulike kostnadene vil påvirke totalsummen, og benytter en restverdistørrelse for å kunne variere analysehorisonten. Utover dette må kostnadsanalysen suppleres med finansielle metoder fra noen med dypere regnskapsmessig forståelse.

Den store mengden med stokastiske variabler fører til en unøyaktighet i den deterministiske forventede kostnaden, særlig ved korte analysehorisonter. Man bør derfor alltid kjøre en simulering for å produsere en sannsynlighetsvurdering som gir et bedre bilde av forventede kostnader.

Kalkylen åpner kun for samkjøring av tre alternativer per simulering (A0: ingen tiltak, A1: tiltak, og A2: fornyelse). Om det finnes flere forskjellige tiltaks- og fornyelsesalternativer kan man kjøre flere ulike simuleringer og ta vare på resultatene for sammenligning senere. Man har dermed muligheten for å ta med flere alternativer fra trinn 2 og inn i kalkylen i trinn 3.

Det har blitt foretatt noen avveininger i detaljeringsgraden i analysen. Blant annet antas det like materialkostnader for alle typer feil. Dette er en tilnærming som ikke representerer virkeligheten. Materialkostnadene vil variere avhengig av hvilken komponent som feiler, og hva man velger å

erstatte den med. Det ble valgt å gjøre det på denne måten for å forenkle beregningene og ikke gjøre det for komplisert.

En annen avveining er modellering av avbruddstid. Vi valgte å modellere avbruddstid én gang per år. Det betyr at alle feil som inntreffer i løpet av et gitt år vil ha lik avbruddstid. Dette var også en beslutning som ble foretatt for å forenkle analysen. Har man mange iterasjoner vil man kunne delvis neglisjere de negative sidene ved denne forenklingen, da man uansett oppnår stor variasjon. Skal kalkylen forbedres burde hver feil modelleres med sin egen avbruddstid.

8.6 Vil metodene og verktøyene i prosessen bidra til å forbedre AE Netts vedlikehold?

Hovedformålet med oppgaven er å lage et rammeverk til ny fornyelsesvurderingsprosess for høyspent luftnett i distribusjonsnett til AE Nett. Et viktig moment å diskutere er derfor om denne prosessen er anvendbar.

Det som hovedsakelig er nytt i vår løsning er en høyere grad av systematikk – hvor man bruker velkjente og utprøvde risikometoder – både for lettere å kunne avdekke potensielle risikosituasjoner, men også for å kunne etterprøve og justere prosessen etter hvert som ny informasjon og effekter av tiltakene dukker opp. I tillegg suppleres de kvalitative vurderingene med en kalkyle som benytter både deterministiske og stokastiske variabler.

Et av forbeholdene for at disse metodene skal fungere er at eventuelle brukere setter seg inn i metodeverktøyene, forstår dem, og eventuelt justerer og tilpasser dem. AE Nett er både i seg selv og som en del av Agder Energi-konsernet en stor organisasjon. Det antas derfor at de innehar ressursene for å kunne jobbe med og videreutvikle slike metoder, i tillegg til å anskaffe de nødvendige verktøy. I tillegg er det en bevegelse i nettbransjen mot risikobasert vedlikehold for å kunne øke effektiviteten i nettdriften [4]. Dette kan føre til flere forskningsprosjekter på området, og ytterligere kompetansedeling både fra andre bransjer og innad og i nettbransjen. Vi ser blant annet flere prosjekter i regi av SINTEF Energi, slik som REPLAN, SysLife, RISK-DSAM etc. som setter fokus på risiko og vedlikehold

Den nye løsningen inneholder blant annet en helhetlig prosessbeskrivelse, og brukerhåndbok for tilstandsbeskrivelse (vedlegg N og B). Dette vil være med på å øke brukervennligheten av løsningen. Rammeverket som er utviklet er et godt utgangspunkt, men det er viktig at brukerne av løsningen videreutvikler den og supplerer eventuelle mangler.

Testingen og evalueringen av løsningen viste at den fungerte godt (kapittel 7). Digitaliseringen av fornyelsesbefaringen medfører en forenkling av dataregistreringen, og gjør at informasjonen blir mer tilgjengelig. Kostnadskalkuleringen viser seg også å takle ulike datasett, og resultatene virker logiske. Det er dog viktig å nevne at resultatene ikke har blitt kvalitetsjekk, og gitt at det finnes mangler i datagrunnlaget burde disse vurderes kritisk.

8.6.1 Revidering av fornyelsesvurderingsprosessen

Det ble oppdaget at alternativer som benyttes i kalkylen settes mot slutten av beslutningstrinnet i fornyelsesvurderingsprosessen. Dette betyr at investeringskostnaden ikke er kjent på tidspunktet hvor man foretar kalkylen. Det bør derfor vurderes om det er mer hensiktsmessig å vurdere de

kvalitative faktorene før kalkylen gjennomføres, slik at man har en klar oversikt over hvilke alternativer som er aktuelle.

Et alternativ vil være å gjennomføre en risikovurdering mellom befaringsstrinnet og kalkyletrinnet, og benytte siste trinn til oppsummering og beslutning. Man får da tydelig klarlagt hvilke type konsekvens (sikkerhet, operativ, økonomisk) som foreligger, og i tillegg blir det lettere å velge alternativer i kalkylen. En slik omlegging vil også være mer i tråd med RCM-prosessen.

Dette ble implementert i den reviderte prosessen. Det betyr at fornyelsesvurderingsprosessen nå består av fire trinn, og at risikoanalysen og alternativfremsetting forekommer som eget trinn mellom befaringen og kalkylen. Dette ble vurdert til å gi en bedre og mer konsis prosess. Den gamle og den reviderte prosessen sammenlignes i vedlegg N.

8.6.2 Er det hensiktsmessig å benytte PDA på befarings?

Metoden for fornyelsesbefaring ble forsøkt forbedret ved å benytte PDA istedenfor manuell utfylling av papirskjema. Overgangen fra «penn og papir» til bruk av digitalisert løsning (PDA) ser ut til å effektivisere datainnsamlingen. Dette fordi man enkelt kan føre inn tilstandskarakter for de ulike komponentene, i tillegg til kommentarer, bilder og innføring av andre kontrollspørsmål som kan ha betydning for vurderingen (kapittel 7).

PDAen gir også mulighet for kartløsning som markerer hvert enkelt mastepunkt. Den er også knyttet opp mot AE Netts vedlikeholdssystem i NetBas, som fører til rask og systematisk overføring av data, kontra manuell innføring av dataene. Utfordringen med bruk av PDA er at enheten er noe sårbar i ulendt terreng under befarings, og det kan oppstå tekniske feil som vil gi negativ effekt. Ved god beskyttelse rundt enheten er den dog et godt hjelpemiddel. Bruken av elektronisk utstyr er på grunn av sårbarheten for regn avhengig av godt «ingeniørvær» (les: sol).

8.6.3 Kan fornyelsesvurderingsprosessen benyttes på andre anlegg enn luftnett?

Gjennomføringen og tankesettet bak fornyelsesprosessen kan tenkes overført til andre spenningsnivåer og andre elektriske løsninger. Dersom prosessen skal benyttes på andre anlegg, annet enn luftnett, må det foretas endringer og tilpasninger. Dette stiller blant annet krav til komponentidentifikasjon, da det må foreligge pålitelig datagrunnlag slik at man unngår bruk av estimeringer og antakelser. Selve prosessen ser dog ut til å kunne overføres, og RCM-tankegangen kan tas i bruk på andre anlegg.

8.6.4 Kan fornyelsesvurderingsprosessen overføres til andre nettselskaper?

Fornyelsesvurderingsprosessen er en kompleks prosess som inkluderer løsninger knyttet til målene i Agder Energi Netts forretningsplan. AE Nett har strategiske mål som omhandler blant annet økt levetid på komponentene (anleggsdelene) i nettet og effektiv investering («mer for mindre»). Se kapittel 3. Dette er en felles utfordring for flere andre nettselskaper i Norge, hvor fornyelses- og investeringsbeslutninger frem til i dag har basert seg på den enkeltes ingeniørs erfaring og kunnskap. Subjektive vurderinger har vært, og er, en dominerende effekt innenfor nettbransjen. Slike metoder vil ikke nødvendigvis medføre suboptimale fornyelses- og investeringsbeslutninger – nettselskapene har klart seg greit frem til nå – men pressede marginer og aldrende anlegg krever nye metoder [4].

Prosessen baserer seg delvis på innspill fra AE Nett, erfaringer fra bransjen og komponenttyper som er typiske for AE Nett, noe som taler for at fornyelsesvurderingsprosessen er tilpasset AE Netts behov. Siden nettselskapene i Norge stort sett har de samme oppgavene og utfordringene taler dette

for at metodene og løsningene som er lagt til i grunn i fornyelsesvurderingsprosessen vil la seg overføre til andre nettselskap. Det er dog et viktig moment at andre nettselskap allerede kan ha utviklet egne metoder for å takle disse utfordringene. Prosessen tar utgangspunkt i AE Netts situasjon, og det er ikke gitt at løsningene kan overføres sømløst.

8.7 Kritikk av metode

Det er ikke gitt at de metodene vi har benyttet og de avveiningene vi har tatt er de «riktige». Vi vil derfor kort presentere kritikk av de beslutninger som har blitt tatt i forbindelse med oppgaven.

8.7.1 Kompetanseoverføring

Metoden anvendt på fornyelsesvurderingsprosessen er et forsøk på å overføre teori og metoder fra offshore-bransjen. Det kan vise seg at enkelte av metodene som er godt egnet i offshore-industrien ikke er brukende i nettbransjen. Datakvaliteten som tas i bruk i risikometodene og risikoberegningene setter store krav til systematikk, nøyaktighet og mulighet til å identifisere et høyt antall parametere og komponenter.

AE Nett har store geografiske områder å kontrollere. Dette kan føre til at metodene anvendt i offshore-bransjen fører til for høy detaljeringsgrad og tilsvarende høye kostnader. På den annen side vil det ved bruk av systematiske metoder være mulig for AE Nett å opparbeide seg en pålitelig database for komponentene, og detaljoversikt over anleggene.

8.7.2 Testing og evaluering

En av de største svakhetene med metoden er at det ikke er blitt utført gode nok tester. Det er riktig nok foretatt to tester (på én virkelig og én tenkt linje), men for at metoden skal kunne kvalifiseres må det utføres flere tester, blant annet av modellene som ligger til grunn. Den manglende testingen kommer av tidsbegrensningen på masteroppgaven, samt ressursene dette hadde lagt beslag på.

8.7.3 Sannsynlighet og modellering

Det ville vært ønskelig å undersøke korrelasjonen mellom feil som oppstår på en linje. For eksempel kan et stolpebrudd eller -velt føre til feil på line, isolator, travers, fundamentering etc. Ved å ta hensyn til korrelasjoner vil man oppnå mer realistiske resultater.

Avbruddstiden har en skarp sannsynlighetsfordeling med lang hale (mange korte, og få lange avbrudd). Se kapittel 5.3. Denne kan modelleres bedre, slik at de meget korte, og de veldig lange avbruddene blir filtrert vekk. Det bør også vurderes om modellene bør baseres på data for linjer med like forutsetninger. Dette ble ikke foretatt i denne oppgaven, da det ble ansett som for arbeidskrevende. Skal kalkylen forbedres burde også hver feil modelleres med sin egen avbruddstid, istedenfor årlig fellesmodellering slik kalkylen gjør i dag.

I denne oppgaven har vi valgt å anta at levetid og avbruddstid er Weibull-fordelt, men det er ikke gitt at dette er riktig. Det er likevel en begrunnet antakelse, da denne fordelingen er mye brukt i problemstillinger knyttet til levetid til komponenter og vedlikeholdsplanlegging.

En viktig del av det å inkludere usikkerhet i beslutningssituasjoner er å oppgi hvor mye man stoler på beslutningsgrunnlaget. Ofte benyttes et konfidensintervall for et kalkulert anslag for å oppgi hvor mye man «tror» på tallene som ligger til grunn. Dette har ikke blitt gjort i denne oppgaven, da vi har benyttet punktestimater. Dette burde gjøres da det øker kvaliteten på informasjonen som blir kommunisert til beslutningstakeren. Dette er særlig viktig når det kommer til kontrollering av tidligere beslutninger. Hvis man skal teste om en beslutning har en virkning er det nødvendig å definere konfidensintervall og signifikansnivå for å kunne måle effekt.

8.7.4 Kost-nytte-analyse

En begrensning i analysen er de få alternativene som kan kjøres i samme simulering. Det kan eksistere flere ulike tiltaks- og fornyelsesalternativer, og derfor kan det være nødvendig å sammenligne flere alternativer. Dette har vi valgt å løse ved å anbefale at det kjøres simuleringer hver for seg for de enkelte alternativene. Ved å lagre resultatene vil man kunne sammenligne alternativene etter simuleringene. En bedre løsning kunne vært å velge flere alternativer i samme simulering.

8.7.5 Tilstandskarakterer

Grensen for karaktersettingen er satt med utgangspunkt i en subjektiv synsvinkel som vil kunne gi ikke-reelle konklusjoner. Det er derimot mulighet for oppdatering og endring av disse, som vil kunne gi mer realistiske konklusjoner etter hvert som AE Nett får tilgang til ny og bedre kunnskap. Blant annet burde det tas stikkprøver av komponenter som tilstandsvurderes, for å kontrollere karakteren opp mot forutsetningene.

Antall karakterer burde kanskje reduseres, både for å være mer i tråd med Energi Norge, og for lettere å kunne skille på tilstandene.

Pålitelighetsgrensene har ikke noe fundament i teori. Grensene har blitt satt i samråd med AE Nett. Disse har ikke blitt testet og det er derfor hensiktsmessig at pålitelighetsgrensene oppdateres når mer data foreligger, og det er mulighet for å teste grensene.

8.7.6 Komponentavgrensninger

Vi har valgt å begrense komponentene som kostnads-analyseres til fire: stolpe, line, isolator og travers. Det er mulig at antallet komponenter bør økes, slik at feilene kan modelleres bedre.

Det har også blitt foretatt en tilnærming ved at komponenter modelleres som komponentsett i et mastepunkt. Det betyr for eksempel at feil på én isolator antas som feil på alle isolatorene i det mastepunktet. Denne avgrensningen gir ikke en riktig beskrivelse av virkeligheten, da man kan skifte ut enkeltkomponenter.

8.7.7 Sviktintensitet

Det har blitt foretatt en tilnærming ved at vi forventer konstant antall enheter i nettet fra 2001 og frem til og med 2014 for å kunne beregne sviktintensitetsestimater. Dette fordi den akkumulerte driftstiden for hver enhetstype er analyseperiodens lengde multiplisert med antall operative enheter i analyseperioden (kapittel 6.1.2).

8.8 Kritikk av datagrunnlag

Det er viktig å presisere at oppgavens formål ikke er å presentere realistiske resultater. Formålet er å presentere de metoder og den risikoteori som vil være hensiktsmessig å benytte for å kunne ta gode beslutninger og legge til grunn god vedlikeholdspraksis. Som en konsekvens av dette har det ikke blitt funnet frem et omfattende datagrunnlag for å beregne resultater.

Det finnes ingen direkte kobling mellom komponentdatabasen og feildatabasen. Dette medfører at det kan fremstilles en generell statistikk, men ikke spesifikt hvilken komponent som feiler. For eksempel *objektnummer: 0011223, kreosotimpregnert stolpe, byggeår 1950, feilår 2015, bakenforliggende årsak: råte*. Det finnes derfor ikke et godt nok datagrunnlag for å utarbeide levetidsmodeller fra denne statistikken.

Som en konsekvens av dette baserer datagrunnlaget seg på ekspertuttalelser og ikke faktiske data fra AE Nett. Datagrunnlaget for levetidsmodellene ble etablert ved at eksperter fra bransjen gjorde rede for en minimum-, normal- og maksimal levetid for de aktuelle komponentene. Dette medfører at Weibull-parameterne, med formingsfaktor m og skaleringsfaktor θ , ikke nødvendigvis er representative for AE Netts komponenter, men representerer antatte verdier.

Kapittel 9: Konklusjon

Denne rapporten har dannet et rammeverk for fornyelsesvurdering av høyspente luftlinjer i distribusjonsnett til Agder Energi Nett, og har supplert med risiko- og vedlikeholdsmetoder som er relevante for å stimulere til riktig vedlikeholdspraksis. Det ble vist at de risikobaserte metodene som benyttes i offshore-bransjen er overførbare til nettbransjen, og at disse vil kunne være effektive ved riktig bruk. Like problemstillinger og oppgaver øker sannsynligheten for at metodene i denne oppgaven kan overføres til resten av nettbransjen i Norge.

9.1 Deskriptiv statistikk

Det ble utarbeidet deskriptiv statistikk som gir en oversikt over eksisterende anlegg med geografisk beliggenhet, aldersfordeling, materialfordeling og svikterfaring, basert på tallmateriale fra Agder Energi Nett. Denne statistikken gir en god oversikt over situasjonen man befinner seg i, og kan benyttes som en del av beslutningsgrunnlaget i forbindelse med fornyelsesvurdering.

Statistikken viser en investeringsbølge med spredning rundt 80-tallet. Dette vil føre til at en stor del av anleggene vil nå sin forventede tekniske levetid om noen ti-år. Dette er med på å øke behovet for gode vedlikeholdsmetoder.

Ved å koble levetidsmodellene opp mot aldersfordelingen kan man forutsi utskiftning i fremtiden. Dette kan være nyttig i forbindelse med langtidsplanlegging og budsjettering. Det viste seg hensiktsmessig å dele sviktmekanismer opp i tilfeldige og slitasjerelaterte feil. Ved å benytte denne oppdelingen i fremtiden kan Agder Energi Nett danne seg en bedre oversikt over sviktintensiteter og nødvendige tiltak.

9.2 Sviktmekanismer

Sviktintensiteten for tilfeldige feil er konstant, mens sviktintensitet for slitasjefeil vil være økende når enheten nærmer seg teknisk levetid. Slitasjefeil er dermed mulig å forutsi, i motsetning til tilfeldige feil. En konsekvens av dette er at man kan kvitte seg med lagerbeholdning for slitasjefeil, da materiell kan bestilles opp og enheten kan skiftes ut preventivt.

På den annen side kan man beregne optimal lagerstørrelse for beredskap mot tilfeldige feil. Det viste seg at lagerberegningen ga usannsynlige lave lagerverdier, med 8 km line, 1 stolpe, 2 isolatorer og ingen traverser. Dette er sannsynligvis fordi de «tilfeldige» feilene delvis er en funksjon av stormvær. Kraftig vind, lynnedslag og snø vil øke sannsynligheten for feil, og det er nødvendig at Agder Energi Nett har en høy grad av beredskap for raskt å kunne gjenopprette strømforsyningen. Beredskap er også forskriftsregulert av Direktoratet for Samfunnssikkerhet og Beredskap. Vi vil derfor ikke anbefale å benytte metoden i denne oppgaven for å beregne optimalt beredskapslager.

Ved å føre sviktdatabaser med oversikt over sviktmekanismer for hver enkelt komponent kan Agder Energi Nett lettere planlegge vedlikeholdet. Dette krever imidlertid ressurser og gode rutiner.

9.3 Pålitelighetsbasert vedlikehold

RCM-metoden vil være et systematisk og nyttig verktøy for utvikling av fremtidig vedlikeholdspraksis hos Agder Energi Nett. Dette er et nytt konsept, og det eksisterer ingen slike verktøy som benyttes av selskapet i dag.

Vedlikeholdsmenyen i RCM-prosessen gjør det mulig å skreddersy vedlikehold til det enkelte anlegg, basert på hvilke feilmekanismer som kan inntreffe. Systematisk gjennomgang av menyen sørger for at alle aktuelle vedlikeholdsalternativer vil bli vurdert, og at eventuelle fornyelsesbeslutninger begrunnes godt. Dette kan være et viktig verktøy for å oppnå målene i forretningsplanen om å forlenge levetiden på nettanleggene, og for å unngå kostnader til unødvendig vedlikehold.

Fornylsesvurderingsprosessen som er utviklet i denne oppgaven baserer seg på denne systematikken. Ved å «tvinge» befarende til å gjennomføre risikoanalyse av anlegget som skal befares er det høyere sannsynlighet for at eventuelle risikomomenter blir oppdaget. Ved å diskutere resultater og vurderinger vil man oppnå mer objektive resultater, og grundigere analyser.

9.4 Levetidsmodeller

Ved å benytte stokastiske levetidsmodeller for de aktuelle komponentene på en linje har det vist seg mulig å angi sannsynligheter for svikt i løpet av et tidsintervall. Dette blir benyttet i kost-nytteanalysen for å undersøke effekten av ulike alternativer.

Det ble også utarbeidet et tilstandskaraktersystem som gjør det mulig å koble tilstand opp mot forventet restlevetid. Dette har vist seg nyttig, da det blir mulig å beregne feilingssannsynligheter basert på alder og tilstand. Ved bruk av tilstandskarakterer kan den forventede restlevetiden oppdateres. Dette er svært nyttig, da komponenter kan slites ulikt avhengig av plassering og belastning. En oppdatering av levetidsmodellen til en enhet gjør derfor at vi kan skille enheten fra den opprinnelige modellen, ved å forlenge eller forkorte forventet levetid ut fra historisk slitasje. Fra et nåverdiperspektiv er det også nyttig å utsette feil, da feilkostnadene vil ha lavere verdi lengre inn i fremtiden.

En del av et preventivt vedlikeholdsprogram er å kunne forutsi når en enhet vil feile, for å kunne optimalisere utskiftningstidspunktet. Modellene angir sannsynlighet for feiling i løpet av et tidsintervall, og man kan dermed angi en grense for når enheten bør skiftes ut.

9.5 Investering basert på kost-nytte-analyse

Det ble vist at analysen ga realistiske resultater. Blant annet ga kalkylen en klar indikasjon på lønnsomhet av både tiltak og fornyelse på linje Skråstadvarden, som forventet i forveien. Det ble konkludert med at både fornyelse og tiltak var lønnsomt, men at tiltaksalternativet ga 55 % sannsynlighet for høyere internrente, og at dette dermed var mer lønnsomt.

Kalkylen reagerer også som forventet på ulike parametere, som testet ut på referanseeksempelet, og vi antar derfor at den er velegnet til investeringsanalyse. Vi ser imidlertid at internrenten gir fordelinger med høye standardavvik for enkelte av alternativene. Det bør derfor vurderes om andre lønnsomhetsmål bør brukes.

Da kalkylen inkluderer stokastiske variabler er det viktig at det kjøres simuleringer. Dette må gjøres for å generere en sannsynlighetsfordeling som representerer usikkerheten i alternativet. En forutsetning for at kalkylen skal være nyttig er at modellene og parameterne som ligger til grunn er pålitelige.

9.6 Fornyelsesvurderingsprosessen

I denne oppgaven har det blitt utarbeidet et rammeverk for en ny fornyelsesvurderingsprosess av høyspente luftlinjer i distribusjonsnett. Denne prosessen benytter risikobaserte metoder og kost-nytte-analyser for å analysere ulike alternativer, basert på tilstandsdata som avdekkes ved befaringsprosessen. Prosessen er systematisk, og vil danne et beslutningsgrunnlag for vurderinger i forbindelse med fornyelse.

Fornyelsesvurderingsprosessen syntes å gi brukbare resultater. Den ble testet på avgrensning Skråstadvarden utenfor Kristiansand, hvor flere ingeniører fra Agder Energi Nett var med på befaringsprosessen. Resultatene fra fornyelsesvurderingen syntes å være realistiske, men de har ikke blitt testet grundig. Forutsetningene som ligger til grunn for levetids- og avbruddsmodellene har heller ikke blitt testet. Dette må undersøkes for å kvalitetssikre og forbedre prosessen.

Selv om prosessen som er blitt utviklet er direkte knyttet opp mot Ager Energi Nett og deres utfordringer, ser vi muligheter for overførbarhet av konstruksjonen. Oppgavens metoder og løsninger vil kunne hjelpe bransjen til å utvikle effektive og systematiske verktøy for vedlikeholdspraksis.

Skal prosessen benyttes på andre anlegg, annet en luftnett, må det foretas endringer. Blant annet burde komponentdetaljeringsprosessen være bedre. Selve prosessen ser dog ut til å kunne overføres, slik at RCM-tankegangen tas i bruk på andre anlegg. Digitalisering av befaringsprosessen syntes å være god og forenkler befaringsprosessen. I tillegg kan det utgjøre grunnlaget for fornyelsesbefaring av andre elektriske anlegg.

Den norske offshore oljebransjen har utviklet gode risiko- og vedlikeholdsmetoder, og har mye kompetanse på dette feltet. Kompetansen syntes overførbar, og metodene kan benyttes i nettbransjen.

9.7 Videre arbeid

Opgavens brede spekter medfører at det dekkes over mange emner. Av tidsmessige årsaker har vi ikke kunnet gå i dybden på alt, og det er derfor mer vi gjerne skulle ha undersøkt. Av den grunn ønsker vi å anbefale følgende punkter for fremtidig arbeid som kan være interessant å arbeide videre med:

- Bruken av PDA kan utvikles med flere og bedre kontrollspørsmål. PDA-metoden kan også testes ut på andre typer anlegg.
- Det burde undersøkes om andre økonomiske metoder kan benyttes for å beregne effekten av ulike tiltak. Blant annet om ulike avskrivninger, investeringstidspunkt, inntekstrammebegrensninger etc. kan benyttes for å forbedre analysen.
- Det bør undersøkes om flere parametere kan inkluderes i levetidsmodellene, slik at disse kan gi mer presise anslag på teknisk levetid og forventet restlevetid. Dette kan være ulike miljøparametere som saltforurensning, vind, snø, og enhetsparametere som belastning, material, produsent etc.
- Det må undersøkes om tilstandskarakterene angir riktig tilstand og pålitelighet, og at riktig restlevetid knyttes opp mot tilstanden.
- Levetidsmodellene er basert på ekspertuttalelser. Disse må oppdateres med reelle data, og det må undersøkes om sannsynlighetsfordelingene er en riktig antakelse om virkeligheten. Det kan også undersøkes om Weibull-fordelingen er den mest hensiktsmessige til dette formålet.
- Avbruddstiden bør modelleres ut fra linjens plassering, avstand til montører, materialtype etc. En slik modellering vil gi en mer realistisk fordeling av avbruddstid for den enkelte linje.
- Det har ikke blitt undersøkt om det er mulig å «vedlikeholde opp» tilstanden til en komponent. Det kan være interessant å se hvordan kalkylen reagerer på reparasjon av en komponent istedenfor utskiftning.
- Metoden som ble benyttet i denne oppgaven for å beregne beredskapslagerstørrelse ga tilsynelatende urealistiske resultater. Det bør derfor undersøkes om det finnes andre og bedre metoder for å beregne lagerstørrelse, slik at man kan redusere kapitalbinding.
- For å optimalisere utskiftningstider og kapitalbinding kan man undersøke bruken av Just In Time og Lean for preventiv utskiftning av enheter i nettet.
- Det kan være interessant å undersøke overførbarheten av prosessen til andre anleggstyper.

Referanser

- [1] K. Lukka, «The constructive research approach. Case study research in logistics,» *Publications of the Turku School of Economics and Business Administration, Series B1*, pp. 83-101, 2003.
- [2] E. Kasanen, K. Lukka og A. Siitonen, «The Constructive Approach in Management Accounting Research,» *Journal of Management Accounting Research*, pp. 243-264, 1993.
- [3] NTB, «Kraftbransjen trenger 1500 nyansatte i året,» *Teknisk Ukeblad*, 2013.
- [4] E. Solvang, «REPLAN - verktøy for å planlegge fornyelser,» *Energiteknikk*, pp. 52-53, Mai 2015.
- [5] M. Rausand og I. B. Utne, *Risikoanalyse - Teori og metoder*, Trondheim: Tapir Akademisk Forlag, 2009.
- [6] N. Golafshani, «Understanding Reliability and Validity in Qualitative Research,» *The Qualitative Report*, pp. 597-607, Desember 2003.
- [7] M. Nordnes, J. Fløan, K. Kallekleiv, S. Refsnæs og T. Welte, «Tilstandskontroll av kraftnett - Håndbok Kraftledning,» Energi Norge, 2011.
- [8] NVE, «Kraftsystemdata,» 16 Februar 2015. [Internett]. Available: <http://www.nve.no/no/Energi1/Kraftsystemet/Kraftsystemdata/>.
- [9] S. Grønmo, *Samfunnsvitenskapelige metoder*, Bergen: Fagbokforlaget, 2011.
- [10] F. Svartdal, «reliabilitet,» 4 Mai 2015. [Internett]. Available: <https://snl.no/reliabilitet>.
- [11] Styret i Agder Energi Nett AS, «Forretningsplan 2015-2019,» Kristiansand, 2014.
- [12] T. Taraldsen og S. Augland, Interviewees, [Intervju]. Januar, februar, mars, april 2015.
- [13] Norges vassdrags- og energidirektorat (NVE), «Om NVE,» 27 Januar 2015. [Internett]. Available: <http://www.nve.no/no/Om-NVE/>.
- [14] Direktoratet for sikkerhet og beredskap (DSB), «Veiledning til forskrift om elektriske forsyningsanlegg,» 27 Januar 2015. [Internett]. Available: <http://www.dsb.no/no/Rettskilder/Regelverk/Oppslagsverket/3898/3899/5519/5520/>.
- [15] REN AS, «Om REN: Strategi,» 27 Januar 2015. [Internett]. Available: http://www.ren.no/om_ren/strategi.
- [16] A. Aksdal, *Elektriske Anlegg - energiforsyningen*, Lørenskog: Yrkesopplæring ans, 1995, pp. 62-72.

- [17] H. William Hart, Engineering Electromagnetics Seventh Edition, New York: McGraw Hill, 2006.
- [18] C. Dr Melber, J. Dr Kielhorn og I. Dr Mangelsdorf, «Concise International Chemical Assessment Document 62: Coal Tar Creosote,» World Health Organization, Geneva, 2004.
- [19] F. Evans, «Fokus på tre - Trykkimpregnering,» Norsk Treteknisk Institutt, Oslo, 2008.
- [20] T. Lassen, Pålitelighetsbasert vedlikehold: Statistiske metoder og levetidsmodeller, Grimstad: Høgskolen i Agder, 2005.
- [21] «Wikipedia: The free encyclopedia,» 28 April 2015. [Internett]. Available: http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Bathtub_curve.svg.
- [22] National Institute of Standards and Technology, «How can Bayesian methodology be used for reliability evaluation,» 5 April 2015. [Internett]. Available: <http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/apr/section1/apr1a.htm>.
- [23] R. B. Bratvold og S. Begg, Making Good Decisions, Society of Petroleum Engineers, 2010, p. 95.
- [24] FMC Energy Systems, «Analysis of critical elements in risk management of a subsea production project,» Grimstad, 2002.
- [25] Norsk Standard, «NS 5814 Krav til risikovurderinger,» Standard Norge, 2008.
- [26] Norsk Teknologisenter (NTS), «NORSOK Standard Z-013N,» Standard Norge, Majorstua, 2001.
- [27] Polititets sikkerhetstjeneste, «Åpen trusselvurdering 2015,» 29 April 2015. [Internett]. Available: http://www.pst.no/media/75480/PSTs_tv2015.pdf.
- [28] T. Lassen, «FMECA, RAM, RCM, ALARP,» Grimstad, 2002.
- [29] K. Øien, «Etablering av risikoindikatorer for overvåking av risikonivået under drift av oljeinstallasjoner,» NTNU, Tondheim, 2001.
- [30] T. Lassen, Pålitelighetsbasert vedlikehold: Logiske analyser og planlegging, Grimstad: Høgskolen i Agder, 2004.
- [31] M. Rausand, «Reliability of Maintained System: Part 3: Maintenance Planning and Optimization,» Wiley, 19 2 2015. [Internett]. Available: <http://frigg.ivt.ntnu.no/ross/slides/srt/chapt9-3.pdf>. [Funnet 21 10 2014].
- [32] SINTEF Industrial Management, OREDA: Offshore Reliability Data Handbook, 4th edition, Høvik: Det Norske Veritas, 2002.
- [33] FASIT, «Om FASIT,» 10 April 2015. [Internett]. Available: <http://fasit.nsp01cp.nhosp.no/om-fasit/category224.html>.

- [34] NVE, «Avbruddsstatistikk,» 6 April 2015. [Internett]. Available: <http://www.nve.no/avbruddsstatistikk>.
- [35] P. D. T. O'Connor og A. Kleyner, Practical reliability engineering, 5th edition, John Wiley & Sons, Ltd, 2012.
- [36] R. Amundsveen, O.-P. Kordahl, H. M. Kvile, M. Lagergren, T. Langset, S. H. Steinnes og K. Vøllestad, «Endring av modeller for fastsettelse av kostnadsnormer fra 2013,» Norges vassdrags- og energidirektorat, Oslo, 2012.
- [37] T. Lassen, Forfatter, *Cost Benefit Analysis (CBA)*. [Performance]. 2015.
- [38] NVE, «Referanserenten,» 6 Mai 2015. [Internett]. Available: <http://www.nve.no/no/Kraftmarked/Regulering-av-nettselskapene/Om-beregning-av-inntektsrammer/Referanserenten/>.
- [39] REN AS, «REN2029 Regional og HS luftnett – Traverser – Råte – Tilstandskontroll - Vedlikehold,» REN AS, 2/2010.
- [40] REN AS, «REN2045 HS Distribusjonsnett og regionalnett luft – Tilstandskontroll - Oppheng,» REN AS, 1/2010.
- [41] Statkraftalliansen, «Vedlikeholdsstyring i Statkraftalliansen,» SINTEF Energi, Trondheim, 2010.
- [42] Norsk Standard, NORSOK Z-013: Risk and emergency preparedness assessment, 3 red., Lysaker: Norsk Standard, 2010.
- [43] Forskrift om elektriske foryningsanlegg, 2005, «Forskrifter,» [Internett]. Available: <https://lovdata.no/dokument/SF/forskrift/2005-12-20-1626>.
- [44] Forskrift om sikkerhet ved arbeid i og drift av elektriske anlegg, 2006, «Forskrifter,» [Internett]. Available: <https://lovdata.no/dokument/SF/forskrift/2006-04-28-458>.
- [45] Energiloven, 1990, «Lover,» [Internett]. Available: <https://lovdata.no/dokument/NL/lov/1990-06-29-50>.
- [46] Y. Li, «Reinvesteringsbehov for stolper i høyspennings fordelingsnett,» Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet, Institutt for elkraftteknikk, Trondheim, 2014.

Vedlegg

- Vedlegg A. FASIT-skjema
- Vedlegg B. Brukerhåndbok for fornyelsesbefaring
- Vedlegg C. E-mail til eksperter
- Vedlegg D. Tilbakemelding fra eksperter
- Vedlegg E. HAZOP
- Vedlegg F. Diverse grafer fra feilstatistikk
- Vedlegg G. FMECA-analyse av line
- Vedlegg H. Feilmekanismer og feilårsaker for kraftledning
- Vedlegg I. Sviktintensiteter for kraftledning
- Vedlegg J. Beredskapslagerberegning
- Vedlegg K. PDA-inspeksjonsrutine (flytskjema)
- Vedlegg L. Trinn 4, oppsummering og beslutning (forslag)
- Vedlegg M. Linjeprofiler for avgrensning Skråstadvarden
- Vedlegg N. Eksisterende, førsteutkast og revidert fornyelsesvurderingsprosess
- Vedlegg O. Brukerbeskrivelse av fornyelsesvurderingsprosessen
- Vedlegg P. Levetidsmodeller og tilstandskarakterer for kraftledningskomponenter

Vedlegg A - FASIT-skjema

FASIT 1 - 22 kV

Beskrivelse/kommentarer

| |
|--|
| |
| |
| |
| |

Generelle opplysninger

| | |
|-------------------------|-------|
| Rapportnummer: | _____ |
| Ref rapportnummer: | _____ |
| Intern ref: | _____ |
| Anleggseier: | _____ |
| Avdeling/Distrikt: | _____ |
| Dato for hendelse: | _____ |
| Kl: _____ Ukedag: _____ | |
| Registrert av: | _____ |
| Kontrollert av: | _____ |

Type hendelse

driftsforstyrrelse
 planlagt utkopling
 varslet
 ikke varslet
 forebyggende vedlikehold
 reparasjon
 om-/nybygging
 utkopling pga tredjepart
 trinning av transformator
 annet _____
 ingen utkopling (AUS, etc)
 annet _____

Anlegg der hendelsen inntraff

| Feil nr | Anlegg 1) | Eier | Annen rapport 2) | Systemspenning 3) | Nettnivå 4) | KILE [%] |
|---------|-----------|------|------------------|-------------------|-------------|----------|
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |

- 1) Eget anlegg, Sluttbruker tilknyttet eget anlegg, Kraftprodusent tilknyttet eget anlegg, Annet nettselskap
 2) FASIT rapportnummer hos annet nettselskap
 3) Spenning på feil- eller utkoplingsstedet
 4) Høyspenning distribusjonsnett- Luft, Blandet eller Kabel, Lavspenning distribusjonsnett

Driftssituasjon før hendelsen inntraff

| |
|--|
| |
|--|

Hendelsesforløp

| ID | Stasjon | Bryter/sikring i eget nett, forbindelse til annet nett, reserveaggregat, reparasjon, AUS, etc | Ut/Inn | Dato | Kl | Seksjonering, reparasjon, etc 1) | Utløsende vern | Koblingsmetode 2) | GIK-respons 3) |
|----|---------|---|--------|------|----|----------------------------------|----------------|-------------------|----------------|
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |

- | | | | |
|---|--|--|---|
| 1) Koder for seksjonering, reparasjon, etc. (se veiledning) FB Første bryterfall/utkopling GS Gjenoppretting startet GA Grovseksjonering avsluttet FI Feil isolert/omkopling avsluttet DG Drift gjenopprettet | SI Siste sluttbruker innkople AL Alarm RS Reparasjon startet RF Rep. foreløpig avsluttet RA Reparasjon avsluttet | 2) AS Automatikk SB Sikringsbrudd MA Manuell FS Fjernstyring GI Automatisk gjeninnkobling | 3) GV GIK Vellykket GM GIK Mislykket FG Feil på GIK IB Ikke GIK-betingelser IG GIK ikke installert |
|---|--|--|---|

Berørte nettdeler/stasjoner
 (transf., avgang, kunde etc)

| |
|--|
| |
| |
| |

Seksjonering utført ved

manuell lokal kopleing
 fjernkontroll
 automatikk
 ingen seksjonering

Førte hendelsen til avbrudd* for sluttbrukere?

ja nei

* spenning < 5% av nominell verdi

Måleverdier til kalibrering

| Målepunkt | Måleverdi [kWh/h] | Timenummer for målingen |
|-----------|-------------------|-------------------------|
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |

Forsyning* gjenopprettet ved

reparasjon
 omkopling
 provisorisk reserve
 provisorisk reparasjon
 innkopling eget nett
 sikringskift
 innkopling annet nett
 annet _____

* til siste sluttbruker

Feilsted **Feilnummer** **Rapportnr** **Ref** **Feil nr**

Anleggsdel med feil

- Anleggsdeler i vannvei
- Ventilsystem
- Turbin
- Generator
- Roterende fasekomp.

- Effekttrykker
- Lastskillebryter
- Skillebryter
- Sikkebryter

- oljefattig trykkluft
- SF₆
- SF₆-isoler
- vaku
- luftisoler
- spenningspåk. del
- drivmekanisme
- isolasjon mot jord
- stativ
- fundament
- jording

Sikring

- Samleskinne/Føring
- skinnelrør
- line
- kabel
- SF₆-isoler
- faseleder
- isolasjon mot jord
- klemme
- kontakt
- stativ
- fundament
- jording

Transformator (fordeling)

- mast
- mastefot
- kiosk
- i bygning
- olje (eksp. tank)
- olje (tett)
- silikonolje
- tørrisoler
- SF₆
- gjennomføring
- kjøleutstyr
- trinnkopler
- eksp.krets
- trafokasse
- innv. enheter

Kabel

- jord
- vann
- luft
- hovedk. 1-leder
- hovedk. flerleder
- PEX
- masse
- kabel
- skjot
- overg.skjot
- endeavsl.
- kabelsko/ klemme

Ved feil på kraftledning og kabel

Fellesfeil? ja nei

Nettstasjon (bygning, arr.)

- mast
- mastefot
- kiosk
- i bygning
- lavsp.stativ
- fundament
- tak/vegg
- dør/lokk
- ventilasjon
- avløp

Kraftledning

- blank
- belagt (BLX)
- hengeledning
- mast
- faseleine
- toppline
- loop
- skjot
- isolator
- travers
- bendsel
- avspenningshylse
- klemme
- bardun
- forankringsstag
- gnistgap
- vibrasjonsdemping
- fundament
- jording

Kondensatorbatteri

- Reaktor
- Avleder
- Spenningstransformator
- Strømtransformator
- Slukkespole
- Stasjonsforsyning
- strømretter
- batteri
- nødaggregat

Vern

- elektromekanisk
- elektronisk
- numerisk
- overstrøm
- spenning
- usymmetri
- jordstrøm
- lysbue
- termisk overlast
- linjevær
- annet

Fjernstyring

- Koplingsstyr
- Måle- og meldesystem
- Signaloverføring

Datautstyr

- Brannteknisk anlegg
- Anleggsdel ikke ident.

Anleggsdelopplysninger

Arkivref.:
 Fabrikat:
 Typebetegnelse:
 Ytelse/kapasitet:
 Fabrikasjonsår:
 Idriftsettelsesår:

Feil karakter

- varig
- forbigående
- gjentakende antall

Systemjording

- isolert
- spole
- annet

Feil oppdaget ved

- bryterfall/sikringsbrudd
- observasjon (tilfeldig)
- tilstandskontroll
- vedlikeholdsarbeid
- overvåking
- melding fra 3. person
- annen feil
- innkopling
- annet

Reparasjonsart og -tid ved varige feil

- Anleggsdel skiftet
 - Anleggsdel skiftet med AUS
 - Midlertidig reparasjon
 - Midlertidig reparasjon med AUS
 - Permanent reparasjon
 - Permanent reparasjon med AUS
- Reparasjonstid

Feilbeskrivelse

Materialtekniske feil

- varmgang
- slitasje
- korrosjon
- materialtretthet
- ukjent

Mekaniske feil

- lekkasje
- løse deler
- skadet del
- vibrasjon
- deformasjon
- ukjent

Elektriske feil

- utladninger
- redusert isolasjonsevne
- dårlig kontakt
- jordslutning
- dobbel jordslutning
- fase-/ledningsbrudd uten jordberøring
- fase-/ledningsbrudd med jordberøring
- kortslutning uten jordberøring
- kortslutning med jordberøring
- lav/høy spenning
- redusert ytelse
- overbelastning
- ukjent

Andre feil

- uteblitt funksjon*
- uønsket funksjon*
- forurenninger
- fremmedlegemer
- annet
- * gjelder kun feil på brytersikring og kontrollstyr
- Ukjent

Utløsende årsak

Omgivelser

- tordenvær
- vind
- snø/is
- frost/tele
- vann/medbær/fuktighet
- salt/forurensning
- fremmedlegemer
- fugl/dyr
- vegetasjon
- ras
- brann/eksplosjon
- annet
- ukjent

Mennesker

- personale
- innleid personale
- andre personer
- feilbetjening
- arbeid/prøving
- trefelling
- gravning/sprenging
- anleggsarbeid
- trafikkskade
- hærverk/sabotasje
- annet
- ukjent

Driftspåkjenninger

- overbelastning
- høy/lav spenning
- vibrasjon
- varig lastøkning
- annet
- ukjent

Teknisk utstyr

- aldri
- slitasje
- korrosjon
- dårlig kontakt
- elektriske utladninger
- lekkasje
- løse deler
- skadet/defekt del
- sprekk/brudd
- råte
- tilsmussing/urenheter
- blokkering
- annet
- ukjent

Konstruksjon/Montasje

- konstruksjons-/ dimensjoneringsfeil
- produksjonsfeil
- montasjefeil
- feil innstilling/justering
- mangelfulle instruksjoner/rutiner
- mangelfullt vedl.hold
- utilstrekkelig vern
- annet
- ukjent
- Tidligere feil
- Årsak ikke klarlagt

Bakenforliggende/medvirkende årsak

- Omgivelser
- Mennesker
- Driftspåkjenninger
- Teknisk utstyr
- Konstruksjon/Montasje
- Ingen kjent bakenforliggende/medvirkende årsak
- Årsak nærmere spesifisert (se utløsende årsak)

Vedlegg B - Brukerhåndbok for fornyelsesbefaring

Innledning

«Formålet med fornyelsesbefaringen er å avklare tilstanden på anlegget. Det skal settes en tallverdi, fra 1-5, hvor karakteren 1 tilsvarer en tilstand som er god som ny, og 5 tilsvarer skadet komponent.»

Svaralternativer

Svaralternativene følger bransjestandarden (kilde) og skal uttrykke komponentens nåværende tilstand.

| |
|---|
| Karakter 1 - Ingen tegn til svekkelse |
| Karakter 2 - Noe tegn til nedbrytning |
| Karakter 3 - Utbredt tegn til nedbrytning |
| Karakter 4 - Tilstanden er kritisk |
| Karakter 5 - Skadet komponent |

I tillegg til svaralternativene 1-5, er det utarbeidet to kontrollspørsmål:

- A. Uønsket komponent
- B. Uønsket anleggsløsning

En uønsket komponent tilsvarer en komponent som ikke er ønsket i nettet på grunn av egenskap, HMS, forskrifter ol. Oversikt over uønskede komponenter er presentert under veiledningsteksten for de ulike komponentene i et mastepunkt (tabell nr).

En uønsket anleggsløsning tilsvarer en anleggsløsning som ikke er egnet i forhold til feil, manglende merking, feilmontasje, forskriftsstridige forhold (FEF2006), HMS ved betjening ol.

Veiledningstekst

I tabellene fremvist nedenfor er det gitt en veiledningstekst for de ulike komponentene som skal fornyelsesbefares ved bruk av PDA. Karakterfordelingen er knyttet opp mot tilstanden til hver enkelt komponent og skal bidra til å foreta en best mulig tilstandsvurdering.

| | |
|---|--|
| Kontrollpunkt: FASELINE | Komponent: <i>Faseline, skjøter, klemmer + jordline</i> |
| Karakter 1 - Ingen synlige tegn til aldring, skader eller feilmontasje | |
| Karakter 2 - Noe synlige misfarging - Påvirket av korrosjon og/eller forurensing | |
| Karakter 3 Synlige misfarging - Betydelig påvirket av korrosjon og forurensing - Linen er skjøtet etter feil/skade | <u>Al/FeAl</u> - Tydelig Al-oksidi mellom trådene - Mellomgrå eller mørkegrå halvblank line eller matt line <u>Fe</u> - Synlig rustangrep <u>Cu</u> - Foreløpig ingen beskrivelse |
| Karakter 4 - Alvorlige tegn på skader og fare for HMS pga. fasebrudd ved vind, snø- og islast - Betydelig misfarging - Påvirket av overbelastning, korrosjon og forurensing - Brudd i enkeltkordeler - Linen er skjøtet på flere faser og/eller jordtråd og er preget etter feil/skade - Deformasjon og/eller sår i line | <u>Al/FeAl</u> - Mellomgrå eller mørkegrå matt line - Ser tydelig Al-oksidi mellom trådene som sprennes fra hverandre <u>Fe</u> - Kraftig rustangrep <u>Cu</u> - Foreløpig ingen beskrivelse <u>Skjøter/klemmer</u> - Synlig tegn på varmgang og kontaktproblemer, farging eller formvariasjoner - Kraftige utbulinger eller formvariasjoner i skjøtehylser - Kraftig korrosjon - Kraftig deformasjon - Klemmen er løs |
| Karakter 5 - Umiddelbar risiko for HMS pga. direkte fare for fasebrudd - Kritisk skadet eller deformert line/skjøt/klemme, | |
| A – Uønsket komponent - 16 Cu - 16 FeAl - Fe (wire) | 16Cu (massiv) tråd er en svak line som må betraktes som uønsket, i hvert fall i tettbygd/beferdet område. |
| B – Uønsket anleggsløsning | |

| | |
|---|---|
| Kontrollpunkt: ISOLATOR | Komponent: Isolator (Pigg-, Henge- og Strekkisolator + Oppheng og Festeutstyr) |
| Karakter 1 - Ingen synlige tegn til aldring, skader eller feilmontasje | |
| Karakter 2 - Noe synlige misfarging - Påvirket av korrosjon og/eller forurensing | |
| Karakter 3 - Synlig misfarging - Betydelig påvirket av korrosjon vær og forurensing | <u>Strekk-/hengekjede</u> - Synlig slitasje på opphengsutstyr, < 10 % reduksjon i tykkelse - Påbegynnende korrosjon i oppheng/sjakkell/kulebolt mellom isolatorskåler <u>Piggisolator</u> - Korrosjonsangrepet piggbolt - Løs piggisolator - Utflassing og skalling på overflate < 10 % - Spor etter krepstrømmer < 30 % av lengden |
| Karakter 4 - Fare for HMS pga. fasenedfall ved vind, snø- og islast - Alvorlig misfarging, korrosjon og forurensing - Sprekk i isolator og/eller armatur - Spor etter lysbue | <u>Strekk-/hengekjede</u> - Kreosot eller annen kraftig forurensing på hengeisolator - Alvorlig korrosjon i oppheng mellom isolatorskålene - Alvorlig slitasje i bolter/oppheng/sjakkell, > 10 % reduksjon i tykkelse - Enkeltskåler er knekt <u>Piggisolator</u> - Skalling av overflate > 10 % - Kraftig rustet feste til piggisolator - Løs/svekket bendsling - Spor etter krepstrømmer > 30 % av lengden |
| Karakter 5 - Umiddelbar risiko for HMS pga. direkte fare for løse faser og overslag - Kritisk skade på isolator/bendsel/opphengsutstyr | |
| A – Uønsket komponent | |
| B – Uønsket anleggsløsning | |

| | |
|--|---|
| Kontrollpunkt: STOLPE | Komponent: <i>Stolpen</i> |
| Karakter 1 - Ingen synlige tegn til aldring, skader eller feilmontasje | |
| Karakter 2 - Noe synlig aldring, påvirket av vær - Mindre hakk, oppflising og hakkespettskader | |
| Karakter 3 - Synlig misfarging - Betydelig uttørking og redusert impregnering - Påbegynte hakkespetthull - Svekket mekanisk styrke | <u>Kreosot</u> - Begynnende brunrâte i kreosot-impregnerte stolper <u>Salt</u> - Râteangrep som kan vokse i saltimpregnerte stolper, myke trefibre |
| Karakter 4 - Alvorlig svekkelse i mekanisk styrke pga. râte eller skade, fare for HMS da stolpen kan velte og påføre fase- og strømprudd ved vind, snø- og islast - Større hakkespetthull og/eller sprekker i stolpe - Skjev mast - Skader etter sammenstøt med kjøretøy eller maskiner | <u>Kreosot</u> Kraftig brunrâteangrep <u>Salt</u> Kraftig overflaterâteangrep |
| Karakter 5 - Umiddelbar risiko for HMS pga. direkte fare for at stolpen kan velte (<i>sett opp skilt med klatreforbud</i>) - Kritiske skader etter lyn, sammenstøt med kjøretøy eller râte, slik at stolpen ikke lenger har god nok mekanisk styrke | |
| A – Uønsket komponent | |
| B – Uønsket anleggsløsning | |

| | |
|---|---|
| Kontrollpunkt: TRAVERS | Komponent: <i>Travers, klave og støttejern</i> |
| Karakter 1 - Ingen synlige tegn til aldring, skader eller feilmontasje | |
| Karakter 2 - Noe synlige misfarging, påvirket av korrosjon og forurensing | <u>Stål</u> - Tegn på hvitrust i overgangen mellom stolpen og travers <u>Tre</u> - Noe uttørket - Redusert impregnering |
| Karakter 3 - Synlig misfarging - Betydelig påvirket av korrosjon og forurensing - Løse klaver | <u>Stål</u> - Flekkvis rød rust eller utbredt rød rust i overgangen mellom stolpen og travers. <u>Tre</u> - Noe råte i traversen - Begynnende ansamling av sopp/mose på traversen |
| Karakter 4 - Alvorlige tegn på skader og fare for HMS ved vind, snø- og islast - Betydelig redusert mekanisk styrke - Skade på klave/bolt, klave løsner og travers begynner å gli ned - Bukling på traversstag eller vridde stag | <u>Stål</u> - Kraftig rustangrep i travers. - Sprekkdannelse i travers. <u>Tre</u> - Kraftig råteangrep i travers - Alvorlig ansamling av sopp/mose |
| Karakter 5 - Umiddelbar risiko for HMS pga. manglende mekanisk støtte av isolatorer - Kritisk skadet eller deformert travers - Brudd på klave eller bolt - Klaven har glidd ned/er fullstendig løs | |
| A – Uønsket komponent | |
| B – Uønsket anleggsløsning | |

| | |
|---|---|
| Kontrollpunkt: STØTTEFUNKSJONER | Komponent: <i>Barduner, fjellstag og fundamentering</i> |
| Karakter 1 - Ingen synlige tegn til aldring, skader eller feilmontasje | |
| Karakter 2 - Noe synlig misfarging, påvirket av korrosjon og forurensing - Rustflekker på bardunwiren | |
| Karakter 3 - Synlig misfarging - Betydelig påvirket av korrosjon - Noe slakk i bardun - Småskader på bardunisolator - Rust på stag og bolter | <u>Bardun</u> - <u>Fjellstag</u> - <u>Fundamentering</u> - |
| Karakter 4 - Alvorlige tegn på skader og fare for HMS ved vind, snø- og islast, pga. mastevelt - Utilfredsstillende støtte av mast - Betydelig rustangrep i bardun eller bardunbolt, eller kordelbrudd i bardunwire - Løse stag, barduner og bolter - Fundamenteringen er sprukket/opprevet/løs - Kraftig rustangrep i fjellstag og bolter | <u>Bardun</u> - <u>Fjellstag</u> - <u>Fundamentering</u> - |
| Karakter 5 - Kritisk skade, deformering eller feilmontering av komponenter som fører til umiddelbar risiko for HMS pga. mastevelt | |
| A – Uønsket komponent | |
| B – Uønsket anleggsløsning | |

Vedlegg C - E-mail til eksperter

Vi er to studenter ved masterstudiet Industriell Økonomi og Teknologiledelse ved Universitetet i Agder. Vi skriver for tiden masteroppgave i samarbeid med Agder Energi Nett, hvor vi skal utarbeide et system for vedlikehold- og fornyelsesvurdering for høyspentlinjer i distribusjonsnett. Tittelen på oppgaven er: "Risikobasert optimalisering av vedlikeholdsplan for høyspent luftnett i distribusjonsnett".

Vi har fått oppgitt ditt navn av Terje Taraldsen og Syvert Augland i AE Nett, og håper du/deres firma har anledning til å sette av litt tid for å svare på noen faglige spørsmål. Kontaktperson og vår veileder ved AE Nett AS er Teknisk sjef Terje Taraldsen (tertar@ae.no / [38 60 79 11](tel:38607911))

I forbindelse med oppgaven trenger vi kostnadsmodeller for de ulike komponentene i et mastepunkt. Det vi særlig vil vite er hvordan de totale kostnadene for materiell, entreprenør og montasje prosentvisfordeler seg på de ulike komponentene.

Det er foreløpig utarbeidet et forslag til kostnadsfordeling som er skrevet inn i tabellen, men vi trenger innspill fra flere erfarne personer for å kvalitetssikre den foreslåtte fordelingen:

Vi trenger også en vurdering av alternative mastekonfigurasjoner med ulikt antall stolper:

- E-mast, enkeltstolpe
- H-mast, to stolper
- Avgreningsmast, tre stolper
- Endemast, fire stolper (dobbel A-mast)

Dette blir en skjønnsmessig fordeling av de totale kostnadene, og vi håper du vil fylle inn ditt forslag i tabellen og returnere den til oss. Tallene i parentes er vårt foreløpige forslag til kostnadsfordeling.

| Mastetype | Mast/barduner | Travers | Isolator | Line |
|-------------------------------------|---------------|---------|----------|-------|
| E-mast, én stolpe | (50%) | (17%) | (10%) | (23%) |
| H-Mast, to stolper | (55%) | (16%) | (10%) | (23%) |
| Avgreningsmast, tre stolper | (60%) | (15%) | (10%) | (23%) |
| Forankrings-/endemast, fire stolper | (65%) | (10%) | (10%) | (23%) |

En annen del av oppgaven blir å anslå kostnader forbundet med reinvestering og utskiftning av komponenter i luftnett i fremtiden. I den forbindelse trenger vi et anslag på forventet levetid for de ulike komponentene. Ditt forslag vil i dette tilfellet bli brukt som en kvalitativ vurdering ved siden av våre beregninger.

Vi ber deg om å vurdere minimal, normal og maksimal forventet levetid på komponenten. Det er ikke nødvendig å fylle ut for alle komponentene. Fyll inn der du føler du har nok kompetanse til å kunne anslå levetid. Tallene i parentes er vårt foreløpige forslag til levetid.

| Komponent | Komponenttype | Min | | Normal | | Maks | |
|-----------|------------------------------------|------|--|--------|--|------|--|
| Line | Cu | (60) | | (70) | | (80) | |
| Line | FeAl (Al) | (60) | | (70) | | (80) | |
| Line | Fe | (40) | | (50) | | (60) | |
| Line | BLX | (40) | | (50) | | (60) | |
| Line | BLL | (40) | | (50) | | (60) | |
| | | | | | | | |
| Isolator | Porselen (piggisolator) | (60) | | (70) | | (80) | |
| Isolator | Kompositt (pigg- og kjedeisolator) | (40) | | (50) | | (60) | |
| Isolator | Glass (kjedeisolator) | (60) | | (70) | | (80) | |
| Isolator | Opphengutstyr/avspenninger | (60) | | (70) | | (80) | |
| Isolator | Bendsel | (60) | | (70) | | (80) | |
| | | | | | | | |
| Travers | Stål | (60) | | (70) | | (80) | |
| Travers | Kreosotimpregnert tre | (40) | | (50) | | (60) | |
| Travers | Aluminium | (50) | | (60) | | (70) | |
| Travers | Klaver/bolter | (60) | | (70) | | (80) | |
| | | | | | | | |
| Mast | Kreosotimpregnert | (60) | | (70) | | (80) | |
| Mast | Saltimpregnert | (40) | | (50) | | (60) | |
| Mast | Bardunwire - Fe | (40) | | (50) | | (60) | |
| Mast | Stag og bolter | (60) | | (70) | | (80) | |

Denne mailen vil bli sendt til flere entreprenører, leverandører, nettselskap og planleggere, samt REN, og vi håper at et gjennomsnitt av disse forslagene vil gi oss et godt grunnlag for riktig kostnadsvurdering og levetidsanslag.

Du velger selv om du ønsker å skrive tallene direkte i mailen, eller om du ønsker å bruke det vedlagte excel-arket.

Om du/dere ønsker det kan oppgaven oversendes når den er ferdig.

For å opprettholde progresjonen i oppgaven ønsker vi svar så raskt som mulig, gjerne innen én uke. Gunstein kan kontaktes på gaugland@gmail.com, og Nicolai kan kontaktes på nstaurvik@gmail.com

Vedlegg D - Tilbakemelding fra eksperter

| <i>min</i> | 60 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 50 | 40 | 40 | 53 | 60 | 38 | 60 | 40 | 50 | 38 | 50 | 40 | 40 | 60 |
|------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| AEN - Taraldsen og Augland | 60 | 60 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 50 | 40 | 40 | 50 | 60 | 60 | 60 | 40 | 50 | 60 | 60 | 40 | 40 | 60 |
| Slagerak - Knut Rydland | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Scampole - Rune Dirlaksen | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| AEN - Øyvind Salvesen | 60 | 50 | | | | | | | | 50 | | | 50 | | | | | | | | 40 | | |
| NVE - Jon-Martin Pettersen | | ja | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Intervju VOLT #8, 11. årgang | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Slagerak - Jon Andreassen | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| SINTEF - Steinar Refsnæs | 60 | 10 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 50 | 60 | 15 | 60 | 40 | 50 | 15 | 10 | 40 | 40 | 60 |
| <i>normal</i> | 69 | 59 | 55 | 55 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 67 | 50 | 50 | 67 | 70 | 70 | 70 | 60 | 60 | 70 | 68 | 48 | 50 | 70 |
| AEN - Taraldsen og Augland | 70 | 70 | 70 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 70 | 50 | 70 | 70 | 70 | 70 | 70 | 70 | 50 | 60 | 70 | 70 | 50 | 50 | 70 |
| Slagerak - Knut Rydland | 65 | 65 | 65 | 40 | 40 | 40 | | | | | | | | | | | | | | | 65 | 45 | |
| Scampole - Rune Dirlaksen | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| AEN - Øyvind Salvesen | 70 | 60 | | | | | | | | 60 | | | 60 | | | | | | | | | | |
| NVE - Jon-Martin Pettersen | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Intervju VOLT #8, 11. årgang | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 80 | | |
| Slagerak - Jon Andreassen | | | 60 | | 40 | 40 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| SINTEF - Steinar Refsnæs | 70 | 40 | 50 | 50 | 50 | 50 | 40 | 40 | 40 | 70 | 50 | 70 | 70 | 70 | 70 | 70 | 70 | 70 | 70 | 70 | 55 | 50 | 50 |
| <i>maks</i> | 87 | 77 | 60 | 60 | 60 | 60 | 60 | 60 | 60 | 80 | 60 | 80 | 80 | 80 | 85 | 80 | 70 | 70 | 80 | 83 | 57 | 60 | 80 |
| AEN - Taraldsen og Augland | 80 | 80 | 60 | 60 | 60 | 60 | 60 | 60 | 60 | 80 | 60 | 80 | 80 | 80 | 80 | 80 | 60 | 70 | 80 | 80 | 60 | 60 | 80 |
| Slagerak - Knut Rydland | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Scampole - Rune Dirlaksen | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| AEN - Øyvind Salvesen | 100 | 70 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 80 | 50 | |
| NVE - Jon-Martin Pettersen | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Intervju VOLT #8, 11. årgang | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 90 | | |
| Slagerak - Jon Andreassen | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| SINTEF - Steinar Refsnæs | 80 | 80 | 60 | 60 | 60 | 60 | 60 | 60 | 60 | 80 | 60 | 80 | 80 | 80 | 80 | 80 | 80 | 70 | 80 | 80 | 60 | 60 | 80 |

Vedlegg E - HAZOP

Metodebeskrivelse (prosess-HAZOP)

En prosess-HAZOP utføres normalt i prosjekteringsfasen av et prosessanlegg, men kan også tas i bruk i senere faser. Analysen gjennomføres ved hjelp av en HAZOP-gruppe som er bygd opp av en leder, sekretær og ulike fagspesialister. Arbeidet som utføres blir styrt av såkalt «idédugnad», samt ledeord eller stikkordslister. Dette setter store krav til lederen. [5]

En HAZOP tar normalt sett utgangspunkt i store enheter. Hver «gren» eller «strøm» som fører til eller fra enheten analyseres én etter én. Grenene eller strømmene som blir analysert blir kalt for noder, hvor hver node blir analysert ved å avklare hvilket formål den har og hva som er normal tilstand i noden. HAZOP-gruppen forsøker, ved hjelp av ledeord eller stikkord, å identifisere mulige avvik fra normal tilstand, årsakene til disse og konsekvensene. Dersom noden har sikkerhetsmessige konsekvenser eller kan føre til driftsmessige problemer, må man undersøke om problemene er tilfredsstillende ivaretatt i den prosessløsningen som allerede foreligger. [5]

Ledeord/stikkordsregister

Ledeordene eller stikkordene skal være enkle ord som har som oppgave å styre idédugnaden for å oppdage avvik. Hvert ledeord eller stikkord kobles opp mot prosessparametere som f.eks. trykk, temperatur ol. for de nodene som undersøkes. Tradisjonelle lede- eller stikkord som tas i bruk i en HAZOP-analyse kan være:

| Stikkordsregister | Veiledning |
|-------------------|--------------------------|
| Mer | Kvantitativ økning |
| Mindre | Kvantitativ redusering |
| Ingen | Benektelse av formålet |
| Motsatt | Motsatt av formålet |
| Del av | Kvalitativ redusering |
| I tillegg til | I tillegg til formålet |
| Annet enn | Fullstendig substitusjon |

Det vil være rom for tilpasning av lede- eller stikkordene. De bør derfor knyttes opp mot formålet med analysen. [5]

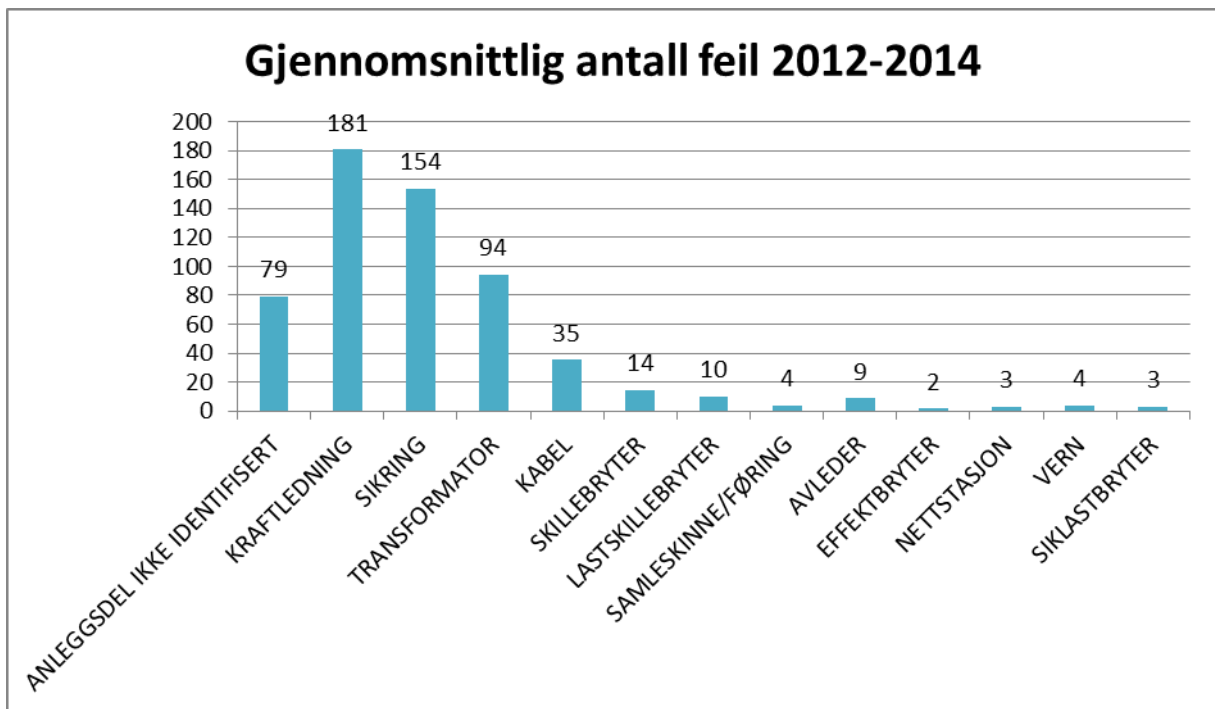
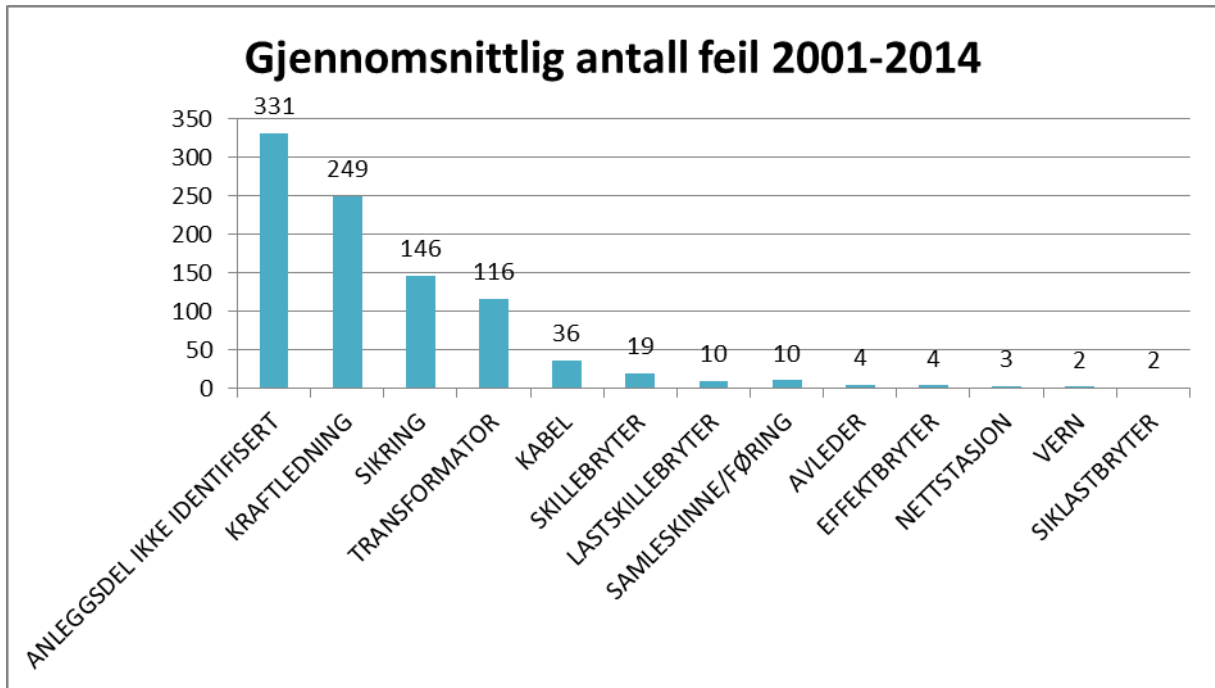
Trinnene i en HAZOP-analyse

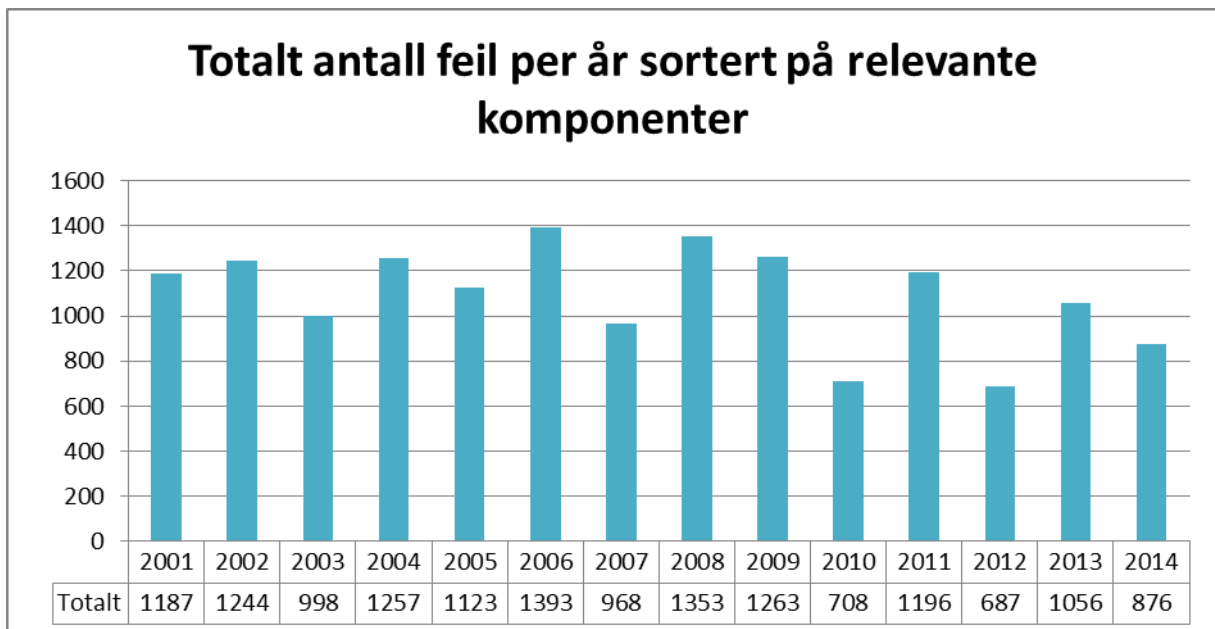
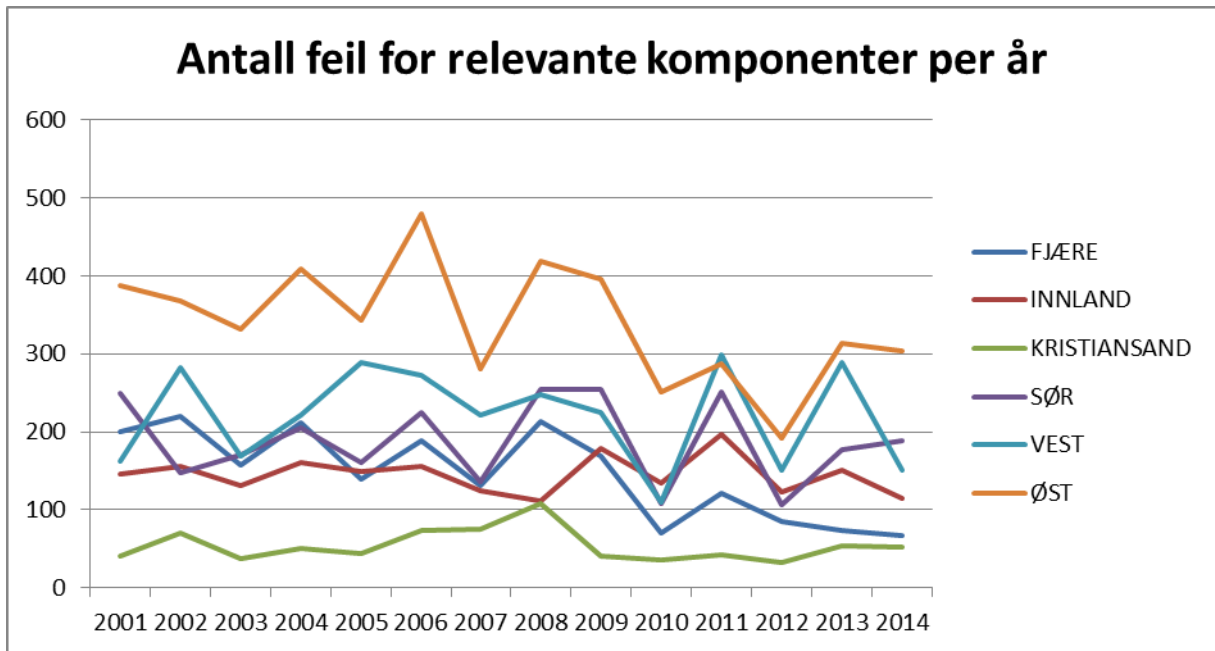
HAZOP-analysen kan gjennomføres i åtte trinn [5]:

| Trinn | Veiledning |
|---|--|
| Trinn 0: Innledning | <ul style="list-style-type: none"> – Definer målsettingen for HAZOP-analysen – Utpek HAZOP-leder og HAZOP-gruppe – Etabler prosjektplan – Frembring dokumentasjon og kontroller at denne er fullstendig og korrekt – Del systemer inn i noder |
| Trinn 1: Identifikasjon av mulig avvik | <ul style="list-style-type: none"> – Avdekk aktuelle parametere – Kombiner hver parameter med aktuelle ledeord – Avdekk mulige avvik gjennom idédugnad |

| | |
|---|--|
| Trinn 2: Identifikasjon av årsaker | <ul style="list-style-type: none"> – Vurder mulige årsaker gjennom idédugnad – Ranger årsakene ut fra rimelighet |
| Trinn 3: Effekt/konsekvens | <ul style="list-style-type: none"> – Anslå mulige og realistiske effekter og konsekvenser av hvert avvik – Ranger effektene og konsekvensene |
| Trinn 4: Barrierer og sikkerhetstiltak | <ul style="list-style-type: none"> – Sett opp en liste over eksisterende barrierer og sikkerhetstiltak knyttet til hvert avvik – Gi en kortfattet vurdering av egenheten og påliteligheten av barrierene og tiltakene |
| Trinn 5: Forslag til forbedringer | <ul style="list-style-type: none"> – Foreslå aktuelle og realistiske forslag til tiltak som kan redusere effekten eller konsekvensen av hvert enkelt avvik – Gi en kortfattet vurdering av effekten og kostnadene knyttet til hvert forslag – Pek ut en ansvarlig for oppfølging av det foreslåtte tiltaket |
| Trinn 6: Risikovurdering | <ul style="list-style-type: none"> – Gi en grovvurdering av sannsynligheten for at avviket skal inntreffe – Gi en grovvurdering av effektene og konsekvensene av avviket |
| Trinn: 7 Rapportering | <ul style="list-style-type: none"> – Utform rapport fra HAZOP-analysen – Presenter rapporten for aktuelle interessenter |

Vedlegg F - Diverse grafer fra feilstatistikk





Vedlegg G - FMECA-analyse av line

| Steg | ID | Beskrivelse |
|------|---|---|
| 1 | Identifikasjon av enhet | Line |
| 2 | Normal funksjon | Lede strøm mellom to punkter, innenfor et gitt spenningsintervall, uten for høye tap eller overslag til andre objekter. |
| 3 | Feilmodi | 1) Overslag til jord 2) Overslag til annen fase 3) For høye tap i linje 4) Spenning utenfor spenningsgrenser (Se arbeidsdokument for utfyllende liste) |
| 4 | Feilårsak | 1) Linebrudd pga. slitasje; linebrudd pga. mekanisk overbelastning; fremmedobjekt mellom line og jord; overslag til jord pga. for høy spenning; line på jord pga. feil i andre enheter. 2) Vind som blåser faser sammen; Linebrudd pga. slitasje; linebrudd pga. mekanisk overbelastning; fremmedobjekt mellom to faser; overslag til annen fase pga. for høy spenning; line på annen fase pga. feil i andre enheter. 3) Reduksjon i tverrsnitt grunnet slitasje; for høy temperatur i line; korrosjon el. reduserer effektivt tverrsnitt; for lav spenning; for høy strømstyrke 4) Feil inngangsspenning; for høy last; feil i vern; overslag til jord eller fase; for høye tap i linje; (Se arbeidsdokument for utfyllende liste) |
| 5 | Oppdagelse | 1) Nettsentral, montør, publikum 2) Nettsentral, montør, publikum 3) Nettsentral, montør, publikum 4) Nettsentral, montør, publikum |
| 6 | Effekt på andre enheter | Overbelastning av isolatorer og opphengutstyr. |
| 7 | Effekt på hele systemet | Linen er hovedkomponenten i en linje. Alle feil på denne er en feil på systemet. |
| 8 | Feilfrekvens | $\lambda(t)$ |
| 9 | Risikovurdering | 1) høy 2) middels 3) lav 4) lav |
| 10 | Preventive tiltak | |
| A | Re-design | 1) Ny linetype 2) Ny linetype 3) Øke kapasitet, ny linetype 4) Øke kapasitet, ny linetype |
| B | Modifisere operasjonsprosedyre | 1) Bedre vern/overvåkningsutstyr 2) Bedre vern/overvåkningsutstyr 3) Begrense sluttbrukers effektuttak; begrense tillatte apparater; overvåkningsutstyr 4) Begrense sluttbrukers effektuttak; begrense tillatte apparater; overvåkningsutstyr |
| C | Tidsbaserte inspeksjoner og vedlikehold | 1) Årlig inspeksjon 2) Årlig inspeksjon |
| 11 | Kurative tiltak | |
| A | Beredskapsplan, reparasjon, prosedyre og reservedeler | Reservedelslager; utkobling og seksjonering av deler med feil; utarbeide standardreparasjoner for ulike feil |

Vedlegg H - Feilmekanismer og feilårsaker for kraftledning

| Komponent | Feilmekanismer | Feilårsaker |
|-----------|----------------------------|--|
| Line | Redusert spenningskvalitet | <ul style="list-style-type: none"> • For høy motstand i line, varmgang • For høy strømføring, overbelastning • Høy spenningsfeltgradient rundt skarpe kanter • Overslag mellom fase og jord eller fase og fase <ul style="list-style-type: none"> ○ Tre på line ○ Line ligger på bakken ○ Fasene blåser inn i hverandre |
| | Redusert ledeevne | <ul style="list-style-type: none"> • Avkuttet line <ul style="list-style-type: none"> ○ Materialsitasje ○ Trær eller andre fremmedlegemer faller på line og kutter den • Overslag til fase eller jord <ul style="list-style-type: none"> ○ Tre på line ○ Line ligger på bakken ○ Fasene blåser inn i hverandre, klarer ikke å slukke lysbue |
| | Feil spenn i line | <ul style="list-style-type: none"> • Materialsitasje • For varm/kald line <ul style="list-style-type: none"> ○ Overbelastning/underbelastning |
| Mast | Reduser bæreevne | <ul style="list-style-type: none"> • Råte <ul style="list-style-type: none"> ○ Klimatiske forhold ○ Saltinnhold i luft/jord/mast ○ Jordforhold ○ Manglende beskyttelsesdeler ○ Redusert beholdning av beskyttelsesmiddel (maling, kreosot etc.) • Hakkespett • Skogbrann • Korrosjon (stålmast) • Feilmontering • Lynnedslag • Kjøretøykollisjon • Stokkmaur • Vind <ul style="list-style-type: none"> ○ Fremmedlegemer knekker stolpe under storm • Mekanisk overspenning fra line <ul style="list-style-type: none"> ○ Belastningstretthet • Brann grunnet jordfeil |
| Travers | Redusert bæreevne | <ul style="list-style-type: none"> • Råte (tre) <ul style="list-style-type: none"> ○ Klimatiske forhold ○ Saltinnhold i luft ○ Manglende beskyttelsesdeler ○ Redusert beholdning av beskyttelsesmiddel (maling, kreosot etc.) • Korrosjon (stål) <ul style="list-style-type: none"> ○ Dårlig galvanisering ○ Skade under montering • Feilmontering (Dårlig feste av travers etc.) • Lynnedslag • Vind <ul style="list-style-type: none"> ○ Fremmedlegemer knekker travers under storm • Mekanisk overspenning fra line <ul style="list-style-type: none"> ○ Belastningstretthet |

| | | |
|-----------------------------------|--|--|
| | | <ul style="list-style-type: none"> • Brann grunnet jordfeil • Sprekkdannelse |
| Isolator | Redusert bæreevne | <ul style="list-style-type: none"> • Sprekkdannelse • Feilmontering <ul style="list-style-type: none"> ○ Manglende tilstramming av bolter etc. |
| | Redusert isolasjonsevne | <ul style="list-style-type: none"> • Forurensning av overflate (salt, støv, fremmedlegemer) <ul style="list-style-type: none"> ○ Saltholdig luft, sjøsprøyt etc. • Sprekkdannelse • Feilmontering • Produksjonsfeil • Overslag kan redusere isolasjonsevnen • Redusert beholdning av beskyttelsesmiddel • Underdimensjonering |
| Bardun, waier og fundament | Redusert støttestøttefunksjon | <ul style="list-style-type: none"> • Avkuttet waier <ul style="list-style-type: none"> ○ Overbelastning (ulykke) ○ Materialsitasje (over tid) • Dårlig feste av barduner <ul style="list-style-type: none"> ○ Overvurdering av jordforhold ○ Endring av jordforhold • Sprekkdannelse • Korrosjon • Belastningsskader <ul style="list-style-type: none"> ○ For mye bevegelse i mast • Produksjonsfeil • Monteringsfeil <ul style="list-style-type: none"> ○ Feil valg av bardun ○ Feil vinkel ○ Feil festemetode • Feil i mastebolt |
| Bryter | Redusert bryteevne | <ul style="list-style-type: none"> • Forurensning av overflate • Underdimensjonering • Overstrømmer <ul style="list-style-type: none"> ○ Sammensveidede deler • Feil bruk <ul style="list-style-type: none"> ○ Kan kanskje ikke slukke lysbuer under last • Korrosjon <ul style="list-style-type: none"> ○ Dårlig eller ingen bevegelse i komponentene |
| | Redusert ledeevne | <ul style="list-style-type: none"> • Dårlig kontaktpunkt |
| Jordtråd | Redusert evne til å føre strømmer til jord | <ul style="list-style-type: none"> • Leder ikke strømmen riktig vei mot jord <ul style="list-style-type: none"> ○ Monteringsfeil ○ Avkuttet kabel • Underdimensjonering • Manglende jording (Monteringsfeil) |

Vedlegg I - Sviktintensiteter for kraftledning

| Slitasjerelaterte feil | FASELINE | | ISOLATOR | | MAST | | TRAVERS | |
|------------------------|-------------|-------------------|-------------|-------------------|-------------|--------------------|-------------|-------------------|
| | Antall feil | λ | Antall feil | λ | Antall feil | λ | Antall feil | λ |
| ALDRING | 9 | 0,00016685 | 0 | 0 | 2 | 3,36071E-06 | 0 | 0 |
| DÅRLIG KONTAKT | 19 | 0,00035223 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| ELEKTRISKE UTLADNINGER | 1 | 1,8538E-05 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| KORROSJON | 5 | 9,2692E-05 | 5 | 2,1004E-06 | 0 | 0 | 1 | 1,6804E-06 |
| LØSE DELER | 12 | 0,00022246 | 13 | 5,4612E-06 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| SALT/FORURENSING | 2 | 3,7077E-05 | 36 | 1,5123E-05 | 2 | 3,36071E-06 | 3 | 5,0411E-06 |
| SKADET/DEFEKT DEL | 25 | 0,00046346 | 3 | 1,2603E-06 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| SLITASJE | 2 | 3,7077E-05 | 92 | 3,8648E-05 | 2 | 3,36071E-06 | 0 | 0 |
| SPREKK/BRUDD | 19 | 0,00035223 | 15 | 6,3013E-06 | 0 | 0 | 1 | 1,6804E-06 |
| VANN/NEDBØR/FUKTIGHET | 4 | 7,4154E-05 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| TOTALT | 98 | 0,00181677 | 164 | 6,8895E-05 | 6 | 1,00821E-05 | 5 | 8,4018E-06 |
| Antall komponenter | 3853 | | 170032 | | 42508 | | 42508 | |
| Driftstid (år) | 14 | | 14 | | 14 | | 14 | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| Tilfelig feil | FASELINE | | ISOLATOR | | MAST | | TRAVERS | |
| | Antall feil | λ | Antall feil | λ | Antall feil | λ | Antall feil | λ |
| ANLEGGSSARBEID | 9 | 0,00016685 | 1 | 4,2009E-07 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| ANNET | 24 | 0,00044492 | 1 | 4,2009E-07 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| ARBEID/PRØVING | 1 | 1,8538E-05 | 0 | 0 | 1 | 1,68036E-06 | 0 | 0 |
| BRANN/EKSPLOSJON | 2 | 3,7077E-05 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1,6804E-06 |
| FEILBETJENING | 1 | 1,8538E-05 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| FREMMEDEGEMER | 4 | 7,4154E-05 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| FUGL/DYR | 45 | 0,00083423 | 6 | 2,5205E-06 | 0 | 0 | 1 | 1,6804E-06 |
| GRAVING/SPRENGING | 6 | 0,00011123 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| HÆRVERK/SABOTASJE | 3 | 5,5615E-05 | 4 | 1,6804E-06 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| HØY/LAV SPENNING | 0 | 0 | 1 | 4,2009E-07 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| MONTASJEFEIL | 3 | 5,5615E-05 | 0 | 0 | 1 | 1,68036E-06 | 0 | 0 |
| OVERBELASTNING | 2 | 3,7077E-05 | 2 | 8,4018E-07 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| RAS | 3 | 5,5615E-05 | 0 | 0 | 1 | 1,68036E-06 | 0 | 0 |
| SNØ/IS | 208 | 0,00385599 | 10 | 4,2009E-06 | 0 | 0 | 2 | 3,3607E-06 |
| TORDENVÆR | 142 | 0,00263246 | 114 | 4,789E-05 | 2 | 3,36071E-06 | 2 | 3,3607E-06 |
| TRAFIKKSKADE | 3 | 5,5615E-05 | 1 | 4,2009E-07 | 1 | 1,68036E-06 | 0 | 0 |
| TREFELLING | 74 | 0,00137184 | 0 | 0 | 1 | 1,68036E-06 | 0 | 0 |
| UKJENT | 0 | 0 | 1 | 4,2009E-07 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| UTILSTREKKELIG VERN | 2 | 3,7077E-05 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| VEGETASJON | 1000 | 0,01853843 | 16 | 6,7214E-06 | 7 | 1,17625E-05 | 5 | 8,4018E-06 |
| VIND | 123 | 0,00228023 | 35 | 1,4703E-05 | 3 | 5,04107E-06 | 4 | 6,7214E-06 |
| TOTALT | 1655 | 0,0306811 | 192 | 8,0657E-05 | 17 | 2,85661E-05 | 15 | 2,5205E-05 |
| Antall komponenter | 3853 | | 170032 | | 42508 | | 42508 | |
| Driftstid (år) | 14 | | 14 | | 14 | | 14 | |

Vedlegg J - Beredskapslagerberegning

| Slitasjerelaterte feil | | | | |
|-------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| INPUT | Line | Stolpe | Isolator | Travers |
| Type | BLL | Saltimpregnert | Komposit | Tre |
| Antall | 3853 | 42908 | 171632 | 42908 |
| MTTF - år | 45,00 | 48,33 | 50,00 | 60,00 |
| MTTF - dager | 16425,00 | 17641,67 | 18250,00 | 21900,00 |
| MTTF - timer | 394200,00 | 423400,00 | 438000,00 | 525600,00 |
| MTTR - dager | 14 | 14 | 14 | 14 |
| MTTR - timer | 336 | 336 | 336 | 336 |
| λ | 2,53678E-06 | 2,36183E-06 | 2,2831E-06 | 1,9026E-06 |
| λ -totalt | 0,009774226 | 0,101341521 | 0,39185388 | 0,08163623 |
| Ønsket beskyttelsesgrad | 95,00 % | 95,00 % | 95,00 % | 95,00 % |
| Kostnad per komponent | kr 30 000 | kr 2 000 | kr 1 000 | kr 1 000 |

OUTPUT

| | | | | | |
|-------------------------|------------|-----------|------------|-----------|------------|
| Reell beskyttelsesgrad | 95,01 % | 95,88 % | 88,49 % | 95,33 % | |
| Antall enheter på lager | 6 | 44 | 145 | 36 | |
| Kapitalbinding | kr 180 000 | kr 88 000 | kr 145 000 | kr 36 000 | kr 449 000 |

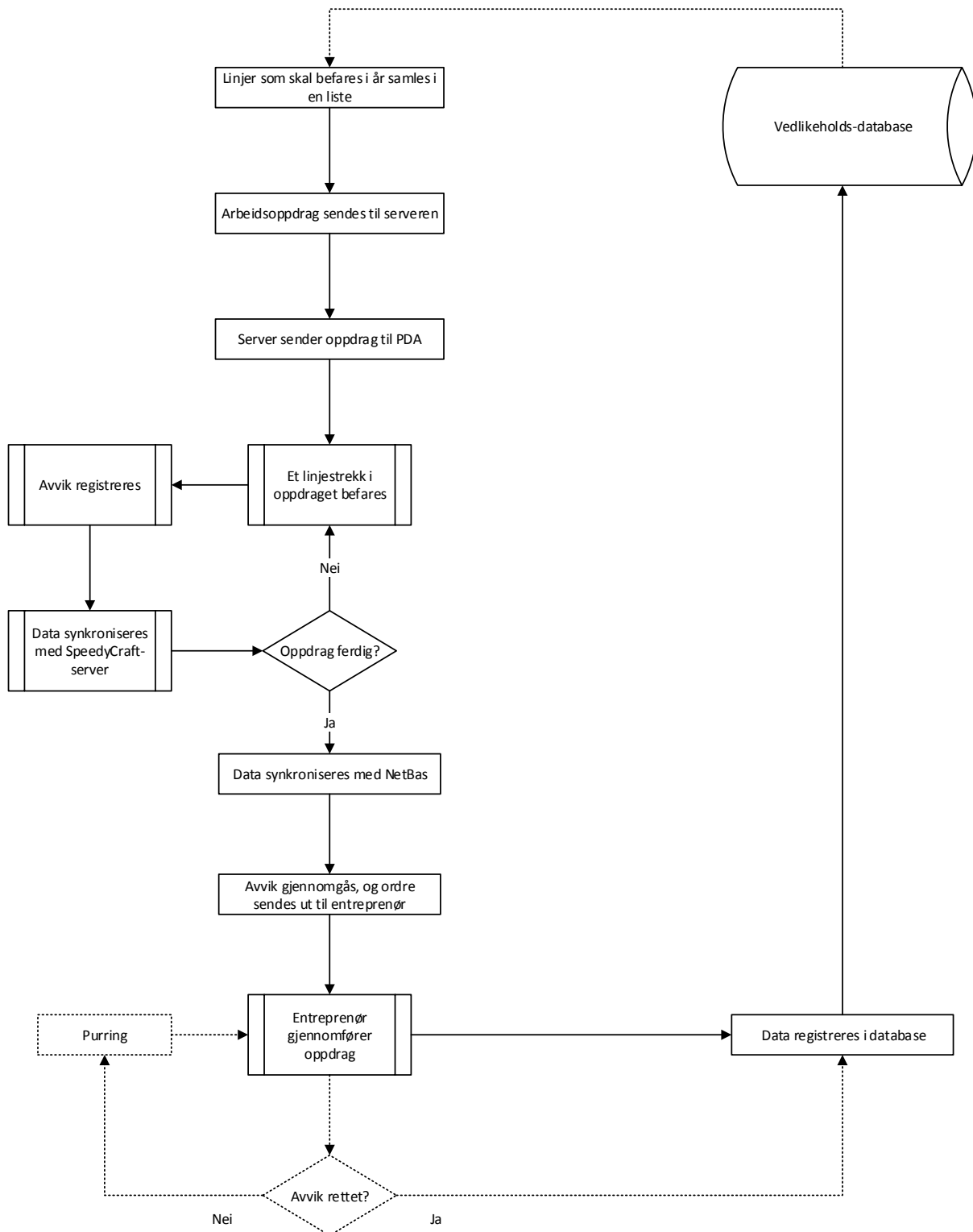
| Tilfeldige feil | | | | |
|-------------------------|-------------|-------------|------------|------------|
| INPUT | Line | Stolpe | Isolator | Travers |
| Antall | 3853 | 42908 | 171632 | 42908 |
| Driftstid (år) | 14 | 14 | 14 | 14 |
| Antall feil | 1656 | 20 | 192 | 15 |
| λ | 3,50453E-06 | 3,80066E-09 | 9,1216E-09 | 2,8505E-09 |
| λ -totalt | 0,013502935 | 0,000163079 | 0,00156556 | 0,00012231 |
| MTTR (timer) | 336 | 336 | 336 | 336 |
| MTTR (dager) | 14 | 14 | 14 | 14 |
| MTTR (år) | 0,038356164 | 0,038356164 | 0,03835616 | 0,03835616 |
| Ønsket beskyttelsesgrad | 95,00 % | 95,00 % | 95,00 % | 95,00 % |
| Kostnad per komponent | kr 30 000 | kr 2 000 | kr 1 000 | kr 1 000 |

OUTPUT

| | | | | | |
|-------------------------|------------|----------|----------|---------|------------|
| Reell beskyttelsesgrad | 95,80 % | 99,86 % | 98,36 % | 95,97 % | |
| Antall enheter på lager | 8 | 1 | 2 | 0 | |
| Kapitalbinding | kr 240 000 | kr 2 000 | kr 2 000 | kr - | kr 244 000 |

| Slitasje | | | | | Tilfeldig | | | | |
|----------|------------|-------------|-------------|-------------|-----------|------------|------------|------------|------------|
| Ns | Line | Mast | Isolator | Travers | Ns | Line | Mast | Isolator | Travers |
| | P(n<Ns) | P(n<Ns) | P(n<Ns) | P(n<Ns) | | P(n<Ns) | P(n<Ns) | P(n<Ns) | P(n<Ns) |
| 0 | 0,0374728 | 1,6291E-15 | 6,59975E-58 | 1,22293E-12 | 0 | 0,01070562 | 0,94667965 | 0,59094791 | 0,9597371 |
| 1 | 0,12306591 | 5,54719E-14 | 8,68942E-56 | 3,35447E-11 | 1 | 0,04857126 | 0,05187286 | 0,31085479 | 0,03944125 |
| 2 | 0,20208284 | 9,44431E-13 | 5,72037E-54 | 4,60062E-10 | 2 | 0,11018357 | 0,00142117 | 0,08175907 | 0,00081044 |
| 3 | 0,22122279 | 1,07195E-11 | 2,51054E-52 | 4,20646E-09 | 3 | 0,16663378 | 2,5958E-05 | 0,01433584 | 1,1102E-05 |
| 4 | 0,18163165 | 9,1252E-11 | 8,26361E-51 | 2,88456E-08 | 4 | 0,18900379 | 3,5558E-07 | 0,00188526 | 1,1406E-07 |
| 5 | 0,11930076 | 6,2144E-10 | 2,17602E-49 | 1,58245E-07 | 5 | 0,17150152 | 3,8968E-09 | 0,00019834 | 9,3748E-10 |
| 6 | 0,06530006 | 3,52675E-09 | 4,77502E-48 | 7,23439E-07 | 6 | 0,12968334 | 3,5587E-11 | 1,7389E-05 | 6,4211E-12 |
| 7 | 0,03063637 | 1,71555E-08 | 8,98133E-47 | 2,83483E-06 | 7 | 0,08405308 | 2,7857E-13 | 1,3067E-06 | 3,7697E-14 |
| 8 | 0,01257676 | 7,30197E-08 | 1,47814E-45 | 9,71983E-06 | 8 | 0,04766846 | 1,908E-15 | 8,592E-08 | 1,9365E-16 |
| 9 | 0,00458932 | 2,76264E-07 | 2,1624E-44 | 2,96236E-05 | 9 | 0,02403013 | 1,1616E-17 | 5,0218E-09 | 8,8425E-19 |
| 10 | 0,0015072 | 9,40699E-07 | 2,84707E-43 | 8,12569E-05 | 10 | 0,01090244 | 6,3652E-20 | 2,6416E-10 | 3,6339E-21 |
| 11 | 0,00044999 | 2,91195E-06 | 3,40776E-42 | 0,000202624 | 11 | 0,00449675 | 3,1707E-22 | 1,2632E-11 | 1,3576E-23 |
| 12 | 0,00012315 | 8,26285E-06 | 3,73897E-41 | 0,00046316 | 12 | 0,00170014 | 1,4478E-24 | 5,5375E-13 | 4,6494E-26 |
| 13 | 3,1111E-05 | 2,16428E-05 | 3,78679E-40 | 0,000977259 | 13 | 0,00059335 | 6,1025E-27 | 2,2407E-14 | 1,4698E-28 |
| 14 | 7,2981E-06 | 5,26395E-05 | 3,56129E-39 | 0,001914714 | 14 | 0,00019229 | 2,3884E-29 | 8,419E-16 | 4,3144E-31 |
| 15 | 1,5979E-06 | 0,000119494 | 3,12593E-38 | 0,003501344 | 15 | 5,816E-05 | 8,7249E-32 | 2,9524E-17 | 1,182E-33 |
| 16 | 3,2798E-07 | 0,000254305 | 2,57231E-37 | 0,006002567 | 16 | 1,6492E-05 | 2,988E-34 | 9,7065E-19 | 3,036E-36 |
| 17 | 6,336E-08 | 0,000509368 | 1,99222E-36 | 0,009685238 | 17 | 4,4014E-06 | 9,6309E-37 | 3,0035E-20 | 7,3393E-39 |
| 18 | 1,156E-08 | 0,000963577 | 1,45723E-35 | 0,014759103 | 18 | 1,1094E-06 | 2,9318E-39 | 8,7773E-22 | 1,6756E-41 |
| 19 | 1,9982E-09 | 0,001726869 | 1,00981E-34 | 0,021307307 | 19 | 2,6491E-07 | 8,455E-42 | 2,43E-23 | 3,6243E-44 |
| 20 | 3,2811E-10 | 0,002940059 | 6,6477E-34 | 0,029222728 | 20 | 6,0095E-08 | 2,3164E-44 | 6,3913E-25 | 7,4472E-47 |
| 21 | 5,1313E-11 | 0,0047672 | 4,16788E-33 | 0,038170131 | 21 | 1,2983E-08 | 6,0442E-47 | 1,601E-26 | 1,4574E-49 |
| 22 | 7,66E-12 | 0,007378489 | 2,49434E-32 | 0,047590817 | 22 | 2,6775E-09 | 1,5054E-49 | 3,828E-28 | 2,7224E-52 |
| 23 | 1,0938E-12 | 0,010923612 | 1,42788E-31 | 0,05675675 | 23 | 5,2816E-10 | 3,5864E-52 | 8,7548E-30 | 4,8643E-55 |
| 24 | 1,4967E-13 | 0,015498217 | 7,83328E-31 | 0,064867696 | 24 | 9,9845E-11 | 8,1882E-55 | 1,9189E-31 | 8,3293E-58 |
| 25 | 1,9661E-14 | 0,021109037 | 4,12541E-30 | 0,071172244 | 25 | 1,812E-11 | 1,7947E-57 | 4,0375E-33 | 1,3692E-60 |
| 26 | 2,4835E-15 | 0,027645329 | 2,08909E-29 | 0,075086092 | 26 | 3,1619E-12 | 3,7822E-60 | 8,1686E-35 | 2,1642E-63 |
| 27 | 3,0208E-16 | 0,034864601 | 1,01873E-28 | 0,076281273 | 27 | 5,3131E-13 | 7,6758E-63 | 1,5914E-36 | 3,294E-66 |
| 28 | 3,5431E-17 | 0,04239878 | 4,7903E-28 | 0,074727782 | 28 | 8,6091E-14 | 1,5021E-65 | 2,9898E-38 | 4,8347E-69 |
| 29 | 4,0124E-18 | 0,049783114 | 2,17484E-27 | 0,070681586 | 29 | 1,3469E-14 | 2,8382E-68 | 5,4232E-40 | 6,8512E-72 |
| 30 | 4,3924E-19 | 0,056505081 | 9,54487E-27 | 0,064625992 | 30 | 2,0369E-15 | 5,1839E-71 | 9,5091E-42 | 9,3852E-75 |
| 31 | 4,6534E-20 | 0,062065821 | 4,05389E-26 | 0,057183104 | 31 | 2,9811E-16 | 9,1629E-74 | 1,6136E-43 | 1,2442E-77 |
| 32 | 4,7757E-21 | 0,06604337 | 1,66796E-25 | 0,049016234 | 32 | 4,2267E-17 | 1,569E-76 | 2,6524E-45 | 1,5978E-80 |
| 33 | 4,7528E-22 | 0,068146253 | 6,6548E-25 | 0,040742548 | 33 | 5,811E-18 | 2,6052E-79 | 4,228E-47 | 1,9898E-83 |

Vedlegg K - PDA-inspeksjonsrutine (flytskjema)



Vedlegg L - Trinn 4, oppsummering og beslutning (forslag)

FORNYELSESVURDERING AV HØYSPENTLINJER (11 - 22 kV).

Trinn #4: OPPSUMMERING OG BESLUTNING

Nøkkelord og nøkkelverdier om linjen

| | |
|-----------------------|--|
| Stasjon/avgang: | |
| Driftsmerking/anlegg: | |
| Byggeår tråd | |
| Byggeår stolper | |
| Befarende | |
| Befaringsdato | |
| Vurderingsdato | |

Økonomisk risikovurdering

Totalkarakter av linjen

Veiledning:

Se Trinn 2.0 - Karaktertabell

Risikoanalyse

Veiledning:

Se Trinn 2 – Risikovurdering (FMECA/HAZOP)

Kalkyleresultater:

Bilde av sannsynlighetsfordeling av alternativ:

Veiledning:

KILE, tap, investeringer og drift/vedlikehold, sannsynlighetsfordelingene, vedlikeholdskostnader.

Se Trinn 3.0 – Inn og utdata og hent inn Monte Carlo simuleringen av det valgte alternativ

Fremtidsbehov**Forsterkning/overføringskapasitet:***Veiledning:*

- Viser analyser (NUP) at "anlegget" må forsterkes med større tverrsnitt enn aktuelt standard tverrsnitt?
- Inneholder "anlegget" line/tråd i kategorien "småtvverrsnitt" (16 Cu, 16 FeAl, Fe 18)?

«Gylden mulighet»*Veiledning:*

- Annet anleggsarbeid som medfører lønnsomhet

Risikofaktorer**HMS***Veiledning:*

- Fare for personskade
- Andre forhold; økt risiko (beferdet område, spes. værutsatt trasé, skogbrannfare)
- Mange stolper med klatreforbud
- Magnetfelter
- Forskriftsmessige avstander ikke overholdt (for nær tilbygg, vei, terreng etc)
- Ønske om å utbedre anlegget pga uheldig design

Leveringskvalitet*Veiledning:*

- Mange / langvarige avbrudd
- Forventet / registrerte avvik fra Forskrift om leveringskvalitet
- Forventet / registrert mange feil /avbrudd

Omdømme*Veiledning:*

- Skade på omdømme
- Nettanlegg som har vært gjenstand for negativ omtale i media
- Klager fra publikum (plassering, estetikk, leveringskvalitet)
- Ønske om å kable anlegget pga omdømmehensyn / andre årsaker

Andre relevante forhold**Linjetrase:***Veiledning:*

- Har dagens linjetrase en akseptabel bredde?
- Er adkomsten til anlegget inkl. eventuelt NS akseptabel?
- Er det fremtidige planer eller grunneier-forhold i området som kan tilsi en traceendring / kabling?
- Har endringer i nettet siden linjen ble bygd medført at det finnes et vesentlig kortere trasé-alternativ?
- Vil kabling av linjen innebære at en kan få global jord i området?

Forskriftskrav:*Veiledning:*

- Andre forskriftskrav som utløser investering (mastetrafo, jording)

Anbefalt(e) tiltak:*Veiledning:*

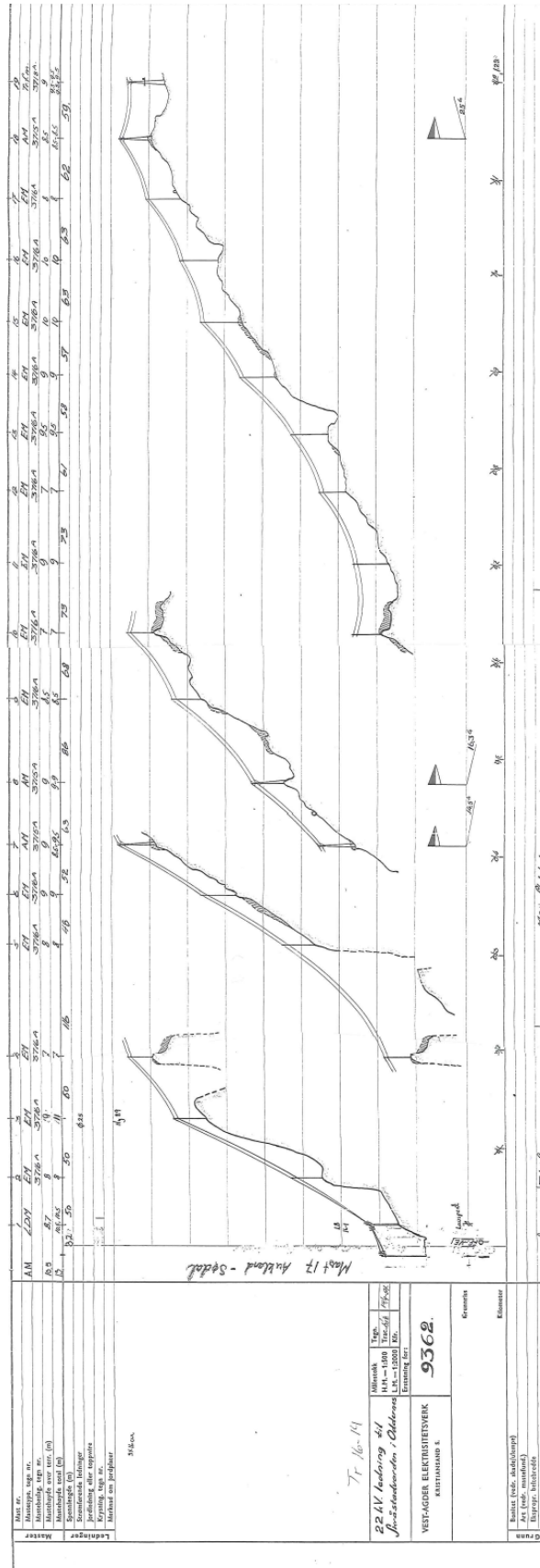
- Anbefalt teknisk løsning inkl. kostnad.
- Fra den som har vært ansvarlig for gjennomføring av fornyelsesbefaringen.

Konklusjon*Veiledning:*

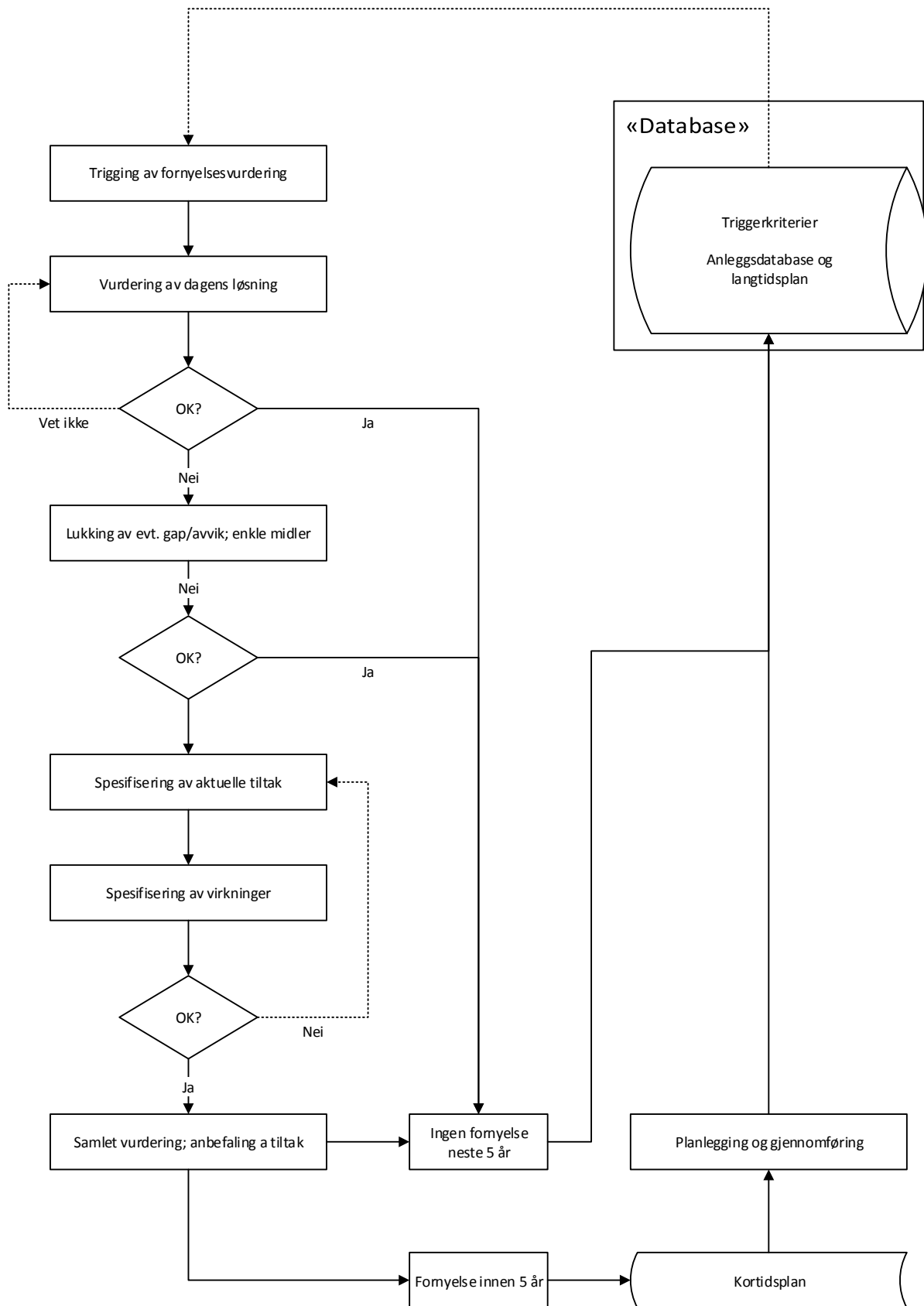
- Avdelingsleder skal her oppsummere og konkludere i fht. fortsatt vedlikehold eller fornyelse.

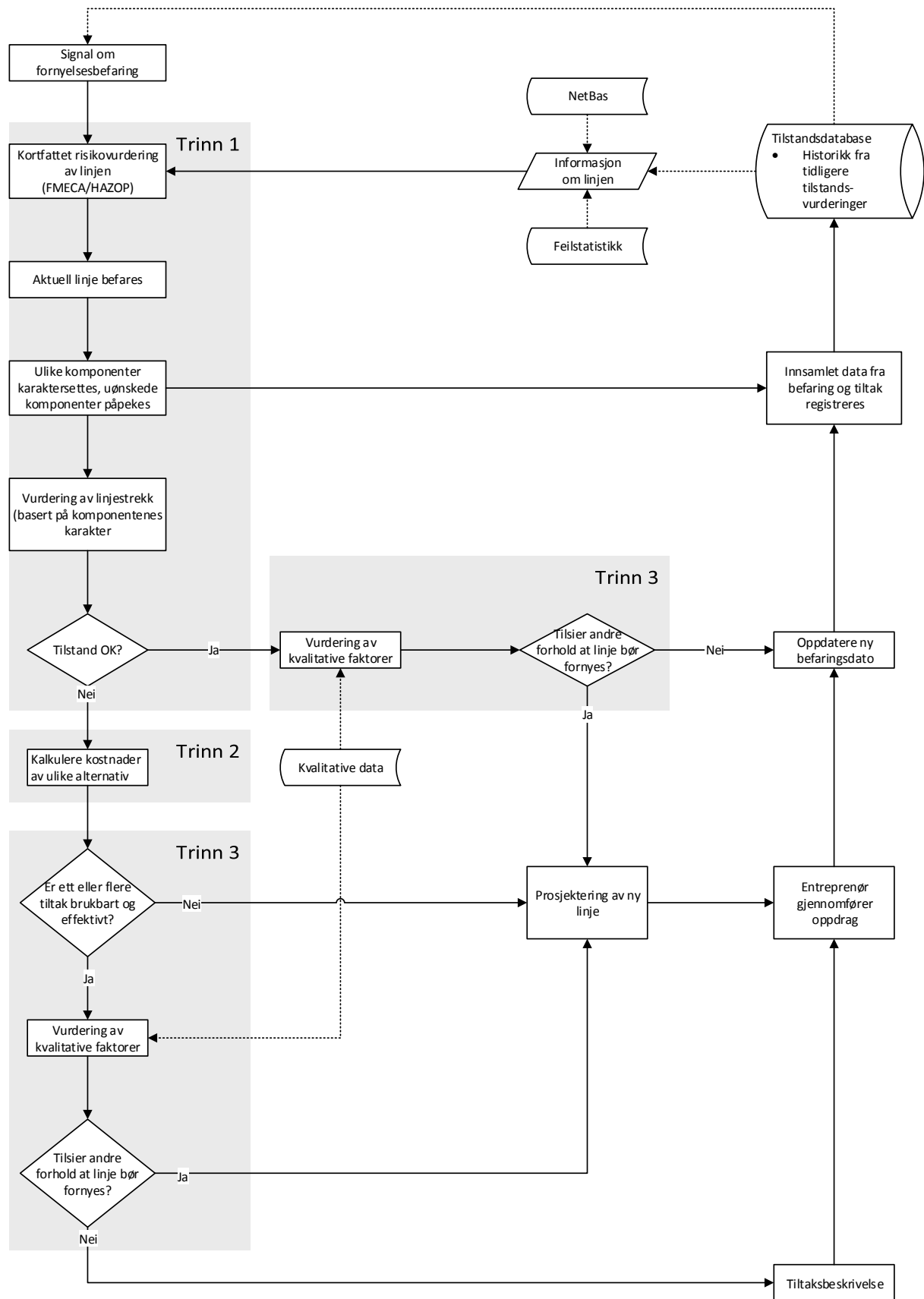
Sted, dato og signatur
Avdelingsleder

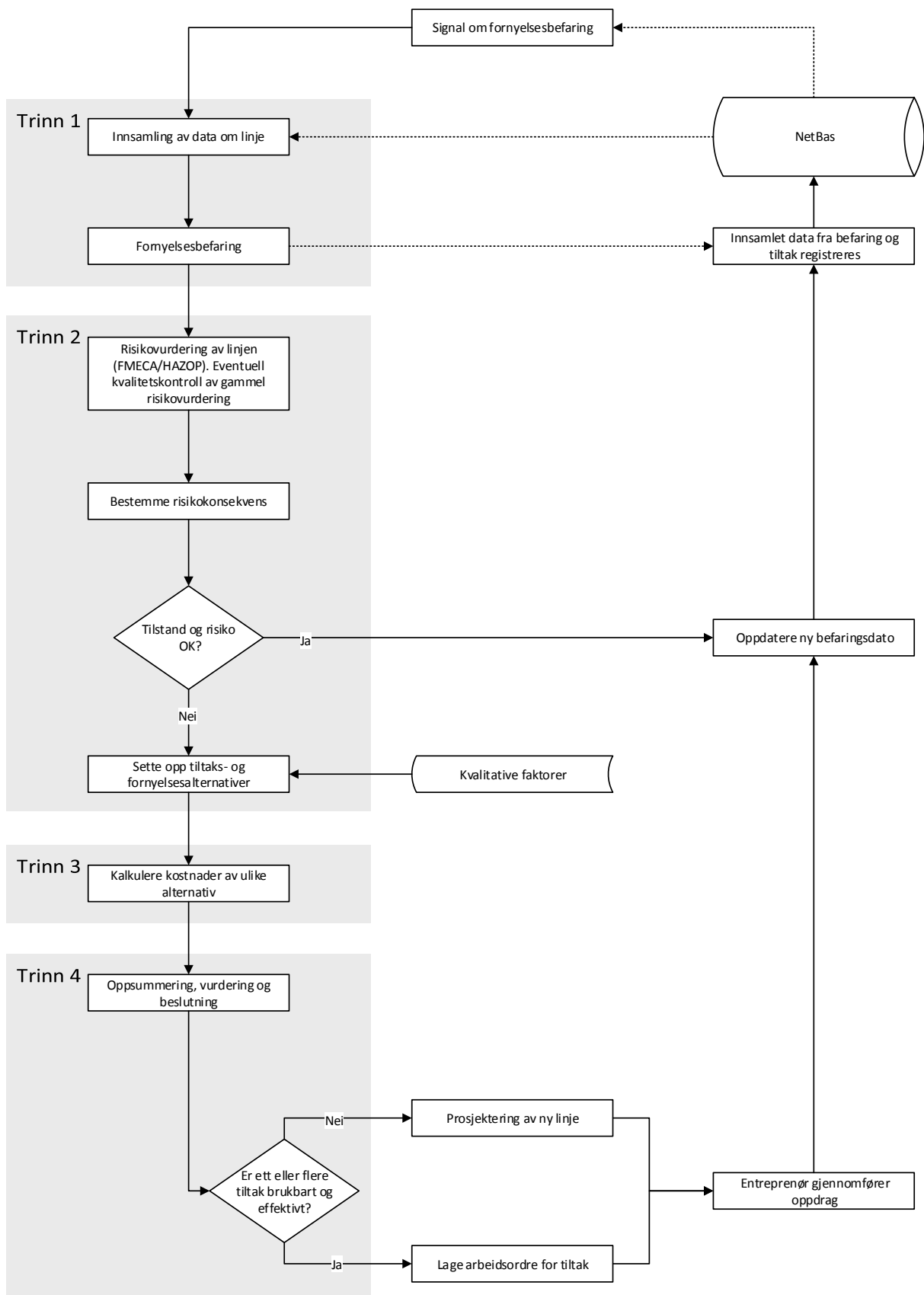
Vedlegg M - Linjeprofiler for avgrensning Skråstadvarden



Vedlegg N - Eksisterende, førsteutkast og revidert fornyelsesvurderingsprosess







Vedlegg 0 - Brukerbeskrivelse av fornyelsesvurderingsprosessen

Trinn 1.0 Data

- Data eksportert fra NetBas til tom excel-fil. Inneholder data fra tilstandsbefaringen.
- Hvert kontrollpunkt er tilknyttet et objektnummer som tilsvarer et mastepunkt.
- Kontrollpunkt med samme objektnummer tilsvarer samme mastepunkt.
- Anmerkning for hvert enkelt kontrollpunkt fremstilles også her og vil kunne påvirke den totale fornyelsesvurderingen (trinn 3).

Trinn 1.1 Pivot

- **Opprett en pivottabell**
 - [Sett inn]
 - [Pivot diagram]
 - [Merk alle data fra Trinn 1.0]
- **Feltliste for pivottabell**
 - Alvorlighetsgrad plasseres i Kolonneetiketter
 - Kontrollpunkt plasseres i Radetiketter
 - Alvorlighetsgrad plasseres i « Σ Verdier» og innstillinger for verdifelt velges til «Antall»
- **Pivottabell**
 - Fremstiller en systematisk oversikt over hvor mange av hver enkelt komponent som har fått en bestemt tilstandskarakter.
- **@Risk**
 - Åpne fornyelsesvurderingsprosessen i @Risk
 - Dette vil gi tilgang på simuleringsverktøy som skal brukes i forbindelse med de stokastiske variablene og for å fremstille en sannsynlighetsfordeling for alternativet man velger i

Trinn 2.1 Karaktertabell

- Kopier pivottabell fra Trinn 1.1. over til merkete områder i Trinn 2.1
 - Område I «**Før tiltak**» (A1:G7)
 - Område II «**Etter tiltak**» (A9:G15)
- Det fremstilles en gjennomsnittsverdi for enkelt komponent for de ulike tilstandskarakterene (Celle H1:H7)
- Gjennomsnittsverdiene multipliseres med en gitt vekningsprosent (Celle I1:I7) og som resulterer i en endelig verdi (J1:J7), som vil være et av vurderingspunktene i Trinn 3.
- I området II «Etter tiltak» må det tas en vurdering for tiltak: **Skifte ut enkelt komponenter.**
 - Velg hvilke komponenter som må skiftes ut (eks. karakter 4 og 5)
 - Vær oppmerksom på at totalsummen må være lik før og etter tiltak.

Trinn 3. Inn- og utdata

I dette trinnet må all informasjon som kan registreres føres inn: Kun blått område kan endres.

INFORMASJON OM GAMMEL LINJE

- Byggeår Skriv inn byggeåret til linjen (gjennomsnittsår)
- Linetype Huk av hvilken linetype det for den befarte linjen.
- Stolpetype Huk av hvilken stolpetype det er for den befarte linjen
- Traverstype Huk av hvilken stolpetype det er for den befarte linjen
- Isolatortype Huk av hvilken isolatortype det er for den befarte linjen.

INFORMASJON OM NY LINJE

- Linetype Huk av linetype
- Stolpetype Huk av stolpetype
- Traverstype Huk av traverstype
- Isolatortype Huk av isolatortype

INFORMASJON OM ANTALL NYE KOMPONENTER

- Antall nye linespenn Hvor mange som ble valgt utskiftet fra Trinn 1.2
- Antall nye stolpepunkt Hvor mange som ble valgt utskiftet fra Trinn 1.2
- Antall nye traverser Hvor mange som ble valgt utskiftet fra Trinn 1.2
- Antall nye isolatorer Hvor mange som ble valgt utskiftet fra Trinn 1.2

DRIFT OG VEDLIKEHOLD

- Inspeksjonintervall Sett inspeksjonintervall
- Befaringsintervall Sett befaringsintervall

INVESTERINGER

- Angi antatt investeringskostnad
- Angi økonomisk levetid
- Restverdi etter analyseperiodens utløp beregnes automatisk ved nåverdi eller avdrag, gitt at økonomiske levetiden er større enn analyseperioden valgt under Parametre.
- Investering korrigeret for restlevetid beregnes automatisk
- Ved å trekke investeringskostnad fra restverdi.
- Investeringskostnad per år beregnes automatisk ved bruk av AVDRAGS-metoden gitt diskonteringsrente og analyseperiode (Parametre) og korrigeret restverdi.

KILE

Avbruddstid per feil (minutter) beregnes automatisk ved bruk av stokastisk variabel og simuleres ved hjelp en Weibullfordeling gitt m og θ fra data fra Bakgrunn- levetidsmodeller.

- Tid fra feil til gjeninnkobling av andre linjer Velg feilrettingstid (min)
- KILE-sats for alle linjer som faller ut Velg totalsum for KILE (Kr)

- KILE-sats for aktuell linje Velg totalsum for KILE (Kr)

PARAMETERE

- Her registreres det en verdi for alle de ulike parameterne.

NÅVERDIER

Henter ut informasjon om nåverdiberegninger kalkulert i Trinn 2.2 Kalkyle.

- «**NNV TAP**» representerer nåverdiberegninger for tap
- «**NNV KILE**» representerer nåverdiberegninger for KILE-kostander
- «**NNV Investeringer**» representerer nåverdiberegninger for investeringer
- «**NNV Drift og vedlikehold**» representerer nåverdiberegninger for drift og vedlikehold.

RESULTAT

Det fremvises et deterministisk resultat for de ulike alternativene (A1 og A2) knyttet opp mot alternativet om å ikke gjøre noe (A0). De ulike verdiene angir differensen i NNV beregninger i tabellen NÅVERDIER, som sier noe om hvor mye man sparer ved å velge et alternativ fremfor et annet.

- Kostander spart ved å velge fornyelse (A2) fremfor A0
- Kostnader spart ved å velge tiltak (A1) fremfor A0
- Kostnader spart ved å velge fornyelse (A2) fremfor tiltak (A1)

De deterministiske verdiene sier ingenting om usikkerheten knyttet opp til å velge et alternativ fremfor det andre. For å inkludere de stokastiske variablene (teknisk levetid og avbruddstid) må det kjøres en simulering for det alternativet man velger.

Fremgangsmåte

1. Trykk på @Risk tilleggsfane i excel
2. Merk det alternativet man ønsker å kjøre en simulering på (resultat og avkastning)
3. Trykk på «Add Output» og trykk OK
4. Vell antall iterasjoner man ønsker (anbefales 5000 -10000)
5. Velg antall simulering man ønsker (anbefales 1)
6. Trykk «start Simulering»
7. Når simuleringen er ferdig vil man ha en sannsynlighetsfordeling for det enkelte tiltak.
8. Dersom man ønsker å se på sannsynlighetsfordelingen for et av de andre resultatene må man huske å fjerne «output» på den forrige simuleringen.
 - a. Merk alternativet som det ble kjørt en simulering på
 - b. Trykk «Add Output»
 - c. Trykk «Remove»
 - d. Merk det nye alternativet og trykk «Add Output»
 - e. Kjør ny simulering.

Vedlegg P - Levetidsmodeller og tilstandskarakterer for kraftledningskomponenter

| Isolator - Kompositt | | | | Isolator- Porselen | | | |
|----------------------|--------------|--------|-------------------|--------------------|--------|-------------------|--|
| Alder | $\lambda(t)$ | $R(t)$ | Tilstandskarakter | $\lambda(t)$ | $R(t)$ | Tilstandskarakter | |
| 0 | 0,00 | 100 % | 1 | 0,00 | 100 % | 1 | |
| 5 | 0,00 | 100 % | 1 | 0,00 | 100 % | 1 | |
| 10 | 0,00 | 100 % | 1 | 0,00 | 100 % | 1 | |
| 15 | 0,00 | 100 % | 1 | 0,00 | 100 % | 1 | |
| 20 | 0,00 | 100 % | 1 | 0,00 | 100 % | 1 | |
| 25 | 0,00 | 99 % | 2 | 0,00 | 100 % | 1 | |
| 30 | 0,01 | 97 % | 2 | 0,00 | 99 % | 2 | |
| 35 | 0,01 | 92 % | 3 | 0,00 | 97 % | 2 | |
| 40 | 0,03 | 83 % | 3 | 0,01 | 95 % | 2 | |
| 45 | 0,04 | 70 % | 4 | 0,01 | 91 % | 3 | |
| 50 | 0,07 | 53 % | 5 | 0,02 | 86 % | 3 | |
| 55 | 0,11 | 33 % | 5 | 0,02 | 78 % | 4 | |
| 60 | 0,17 | 16 % | 5 | 0,03 | 68 % | 4 | |
| 65 | 0,25 | 6 % | 5 | 0,04 | 56 % | 5 | |
| 70 | 0,35 | 1 % | 5 | 0,06 | 43 % | 5 | |
| 75 | 0,49 | 0 % | 5 | 0,08 | 31 % | 5 | |
| 80 | 0,66 | 0 % | 5 | 0,10 | 20 % | 5 | |
| 85 | 0,88 | 0 % | 5 | 0,13 | 11 % | 5 | |
| 90 | 1,15 | 0 % | 5 | 0,16 | 5 % | 5 | |
| 95 | 1,48 | 0 % | 5 | 0,20 | 2 % | 5 | |
| 100 | 1,88 | 0 % | 5 | 0,25 | 1 % | 5 | |

| Isolator - Glass | | | | Isolator - Opphengsutstyr | | | |
|------------------|--------------|--------|-------------------|---------------------------|--------|-------------------|--|
| Alder | $\lambda(t)$ | $R(t)$ | Tilstandskarakter | $\lambda(t)$ | $R(t)$ | Tilstandskarakter | |
| 0 | 0,00 | 100 % | 1 | 0,00 | 100 % | 1 | |
| 5 | 0,00 | 100 % | 1 | 0,00 | 100 % | 1 | |
| 10 | 0,00 | 100 % | 1 | 0,00 | 100 % | 1 | |
| 15 | 0,00 | 100 % | 1 | 0,00 | 100 % | 1 | |
| 20 | 0,00 | 100 % | 1 | 0,00 | 100 % | 1 | |
| 25 | 0,00 | 100 % | 1 | 0,00 | 100 % | 1 | |
| 30 | 0,00 | 99 % | 2 | 0,00 | 100 % | 1 | |
| 35 | 0,00 | 98 % | 2 | 0,00 | 100 % | 1 | |
| 40 | 0,00 | 97 % | 2 | 0,00 | 99 % | 2 | |
| 45 | 0,01 | 93 % | 3 | 0,00 | 98 % | 2 | |
| 50 | 0,01 | 88 % | 3 | 0,01 | 96 % | 2 | |
| 55 | 0,02 | 81 % | 3 | 0,01 | 92 % | 3 | |
| 60 | 0,03 | 70 % | 4 | 0,02 | 84 % | 3 | |
| 65 | 0,05 | 57 % | 5 | 0,04 | 71 % | 4 | |
| 70 | 0,07 | 43 % | 5 | 0,07 | 54 % | 5 | |
| 75 | 0,10 | 29 % | 5 | 0,12 | 34 % | 5 | |
| 80 | 0,13 | 16 % | 5 | 0,19 | 16 % | 5 | |
| 85 | 0,17 | 8 % | 5 | 0,29 | 5 % | 5 | |
| 90 | 0,22 | 3 % | 5 | 0,44 | 1 % | 5 | |
| 95 | 0,29 | 1 % | 5 | 0,65 | 0 % | 5 | |
| 100 | 0,37 | 0 % | 5 | 0,93 | 0 % | 5 | |

| Isolator - Bendseloppheingsbolter | | | | Travers - Stål | | | |
|-----------------------------------|--------------|-------|-------------------|---------------------|-------|-------------------|--|
| Alder | $\lambda(t)$ | R(t) | Tilstandskarakter | $\lambda(t)$ | R(t) | Tilstandskarakter | |
| 0 | 0,00 | 100 % | 1 | 0,00 | 100 % | 1 | |
| 5 | 0,00 | 100 % | 1 | 0,00 | 100 % | 1 | |
| 10 | 0,00 | 100 % | 1 | 0,00 | 100 % | 1 | |
| 15 | 0,00 | 99 % | 2 | 0,00 | 100 % | 1 | |
| 20 | 0,00 | 99 % | 2 | 0,00 | 100 % | 1 | |
| 25 | 0,00 | 97 % | 2 | 0,00 | 100 % | 1 | |
| 30 | 0,01 | 95 % | 2 | 0,00 | 100 % | 1 | |
| 35 | 0,01 | 92 % | 3 | 0,00 | 100 % | 1 | |
| 40 | 0,01 | 89 % | 3 | 0,00 | 99 % | 2 | |
| 45 | 0,01 | 84 % | 3 | 0,00 | 98 % | 2 | |
| 50 | 0,02 | 78 % | 4 | 0,01 | 96 % | 2 | |
| 55 | 0,02 | 72 % | 4 | 0,01 | 92 % | 3 | |
| 60 | 0,02 | 65 % | 4 | 0,02 | 84 % | 3 | |
| 65 | 0,03 | 57 % | 5 | 0,04 | 71 % | 4 | |
| 70 | 0,03 | 49 % | 5 | 0,07 | 54 % | 5 | |
| 75 | 0,04 | 42 % | 5 | 0,12 | 34 % | 5 | |
| 80 | 0,04 | 34 % | 5 | 0,19 | 16 % | 5 | |
| 85 | 0,05 | 27 % | 5 | 0,29 | 5 % | 5 | |
| 90 | 0,05 | 21 % | 5 | 0,44 | 1 % | 5 | |
| 95 | 0,06 | 16 % | 5 | 0,65 | 0 % | 5 | |
| 100 | 0,07 | 12 % | 5 | 0,93 | 0 % | 5 | |
| Travers - Kreosotimpregnert | | | | Travers - Aluminium | | | |
| Alder | $\lambda(t)$ | R(t) | Tilstandskarakter | $\lambda(t)$ | R(t) | Tilstandskarakter | |
| 0 | 0,00 | 100 % | 1 | 0,00 | 100 % | 1 | |
| 5 | 0,00 | 100 % | 1 | 0,00 | 100 % | 1 | |
| 10 | 0,00 | 100 % | 1 | 0,00 | 100 % | 1 | |
| 15 | 0,00 | 100 % | 1 | 0,00 | 100 % | 1 | |
| 20 | 0,00 | 99 % | 2 | 0,00 | 100 % | 1 | |
| 25 | 0,00 | 99 % | 2 | 0,00 | 100 % | 1 | |
| 30 | 0,00 | 97 % | 2 | 0,00 | 99 % | 2 | |
| 35 | 0,01 | 94 % | 3 | 0,00 | 99 % | 2 | |
| 40 | 0,01 | 89 % | 3 | 0,01 | 96 % | 2 | |
| 45 | 0,02 | 83 % | 3 | 0,01 | 92 % | 3 | |
| 50 | 0,03 | 74 % | 4 | 0,02 | 84 % | 3 | |
| 55 | 0,04 | 63 % | 4 | 0,04 | 71 % | 4 | |
| 60 | 0,05 | 51 % | 5 | 0,07 | 53 % | 5 | |
| 65 | 0,06 | 39 % | 5 | 0,12 | 34 % | 5 | |
| 70 | 0,08 | 27 % | 5 | 0,18 | 16 % | 5 | |
| 75 | 0,10 | 17 % | 5 | 0,27 | 5 % | 5 | |
| 80 | 0,13 | 10 % | 5 | 0,40 | 1 % | 5 | |
| 85 | 0,16 | 5 % | 5 | 0,57 | 0 % | 5 | |
| 90 | 0,19 | 2 % | 5 | 0,80 | 0 % | 5 | |
| 95 | 0,23 | 1 % | 5 | 1,10 | 0 % | 5 | |
| 100 | 0,27 | 0 % | 5 | 1,49 | 0 % | 5 | |

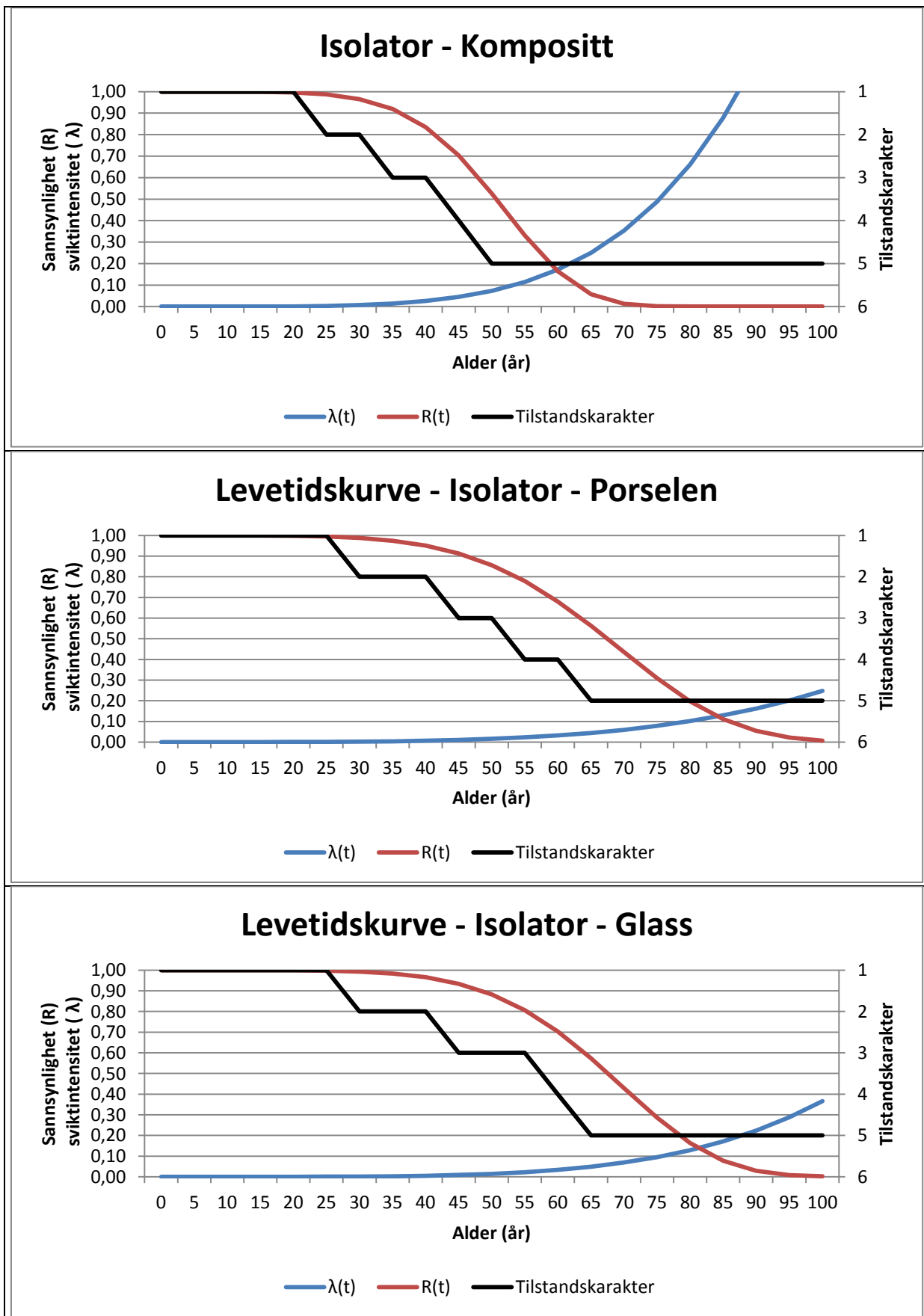
| Travers - Klaver/bolter | | | | Mast - Kreosotimpregnert | | | |
|-------------------------|--------------|-------|-------------------|--------------------------|-------|-------------------|--|
| Alder | $\lambda(t)$ | R(t) | Tilstandskarakter | $\lambda(t)$ | R(t) | Tilstandskarakter | |
| 0 | 0,00 | 100 % | 1 | 0,00 | 100 % | 1 | |
| 5 | 0,00 | 100 % | 1 | 0,00 | 100 % | 1 | |
| 10 | 0,00 | 100 % | 1 | 0,00 | 100 % | 1 | |
| 15 | 0,00 | 100 % | 1 | 0,00 | 100 % | 1 | |
| 20 | 0,00 | 99 % | 2 | 0,00 | 100 % | 1 | |
| 25 | 0,00 | 98 % | 2 | 0,00 | 99 % | 2 | |
| 30 | 0,00 | 96 % | 2 | 0,00 | 98 % | 2 | |
| 35 | 0,01 | 94 % | 3 | 0,00 | 97 % | 2 | |
| 40 | 0,01 | 90 % | 3 | 0,01 | 94 % | 3 | |
| 45 | 0,01 | 86 % | 3 | 0,01 | 90 % | 3 | |
| 50 | 0,01 | 81 % | 3 | 0,02 | 85 % | 3 | |
| 55 | 0,02 | 74 % | 4 | 0,02 | 78 % | 4 | |
| 60 | 0,02 | 67 % | 4 | 0,03 | 68 % | 4 | |
| 65 | 0,03 | 58 % | 5 | 0,04 | 58 % | 5 | |
| 70 | 0,03 | 50 % | 5 | 0,05 | 46 % | 5 | |
| 75 | 0,04 | 42 % | 5 | 0,07 | 34 % | 5 | |
| 80 | 0,05 | 33 % | 5 | 0,08 | 23 % | 5 | |
| 85 | 0,06 | 26 % | 5 | 0,11 | 15 % | 5 | |
| 90 | 0,06 | 19 % | 5 | 0,13 | 8 % | 5 | |
| 95 | 0,07 | 14 % | 5 | 0,16 | 4 % | 5 | |
| 100 | 0,08 | 9 % | 5 | 0,19 | 2 % | 5 | |
| Mast - Saltimpregnert | | | | Mast - Bardunwire | | | |
| Alder | $\lambda(t)$ | R(t) | Tilstandskarakter | $\lambda(t)$ | R(t) | Tilstandskarakter | |
| 0 | 0,00 | 100 % | 1 | 0,00 | 100 % | 1 | |
| 5 | 0,00 | 100 % | 1 | 0,00 | 100 % | 1 | |
| 10 | 0,00 | 100 % | 1 | 0,00 | 100 % | 1 | |
| 15 | 0,00 | 100 % | 1 | 0,00 | 100 % | 1 | |
| 20 | 0,00 | 100 % | 1 | 0,00 | 100 % | 1 | |
| 25 | 0,00 | 99 % | 2 | 0,00 | 99 % | 2 | |
| 30 | 0,01 | 97 % | 2 | 0,01 | 97 % | 2 | |
| 35 | 0,01 | 93 % | 3 | 0,01 | 92 % | 3 | |
| 40 | 0,03 | 84 % | 3 | 0,03 | 83 % | 3 | |
| 45 | 0,06 | 68 % | 4 | 0,04 | 70 % | 4 | |
| 50 | 0,11 | 45 % | 5 | 0,07 | 53 % | 5 | |
| 55 | 0,18 | 22 % | 5 | 0,11 | 33 % | 5 | |
| 60 | 0,30 | 7 % | 5 | 0,17 | 16 % | 5 | |
| 65 | 0,47 | 1 % | 5 | 0,25 | 6 % | 5 | |
| 70 | 0,71 | 0 % | 5 | 0,35 | 1 % | 5 | |
| 75 | 1,05 | 0 % | 5 | 0,49 | 0 % | 5 | |
| 80 | 1,52 | 0 % | 5 | 0,66 | 0 % | 5 | |
| 85 | 2,14 | 0 % | 5 | 0,88 | 0 % | 5 | |
| 90 | 2,96 | 0 % | 5 | 1,15 | 0 % | 5 | |
| 95 | 4,03 | 0 % | 5 | 1,48 | 0 % | 5 | |
| 100 | 5,39 | 0 % | 5 | 1,88 | 0 % | 5 | |

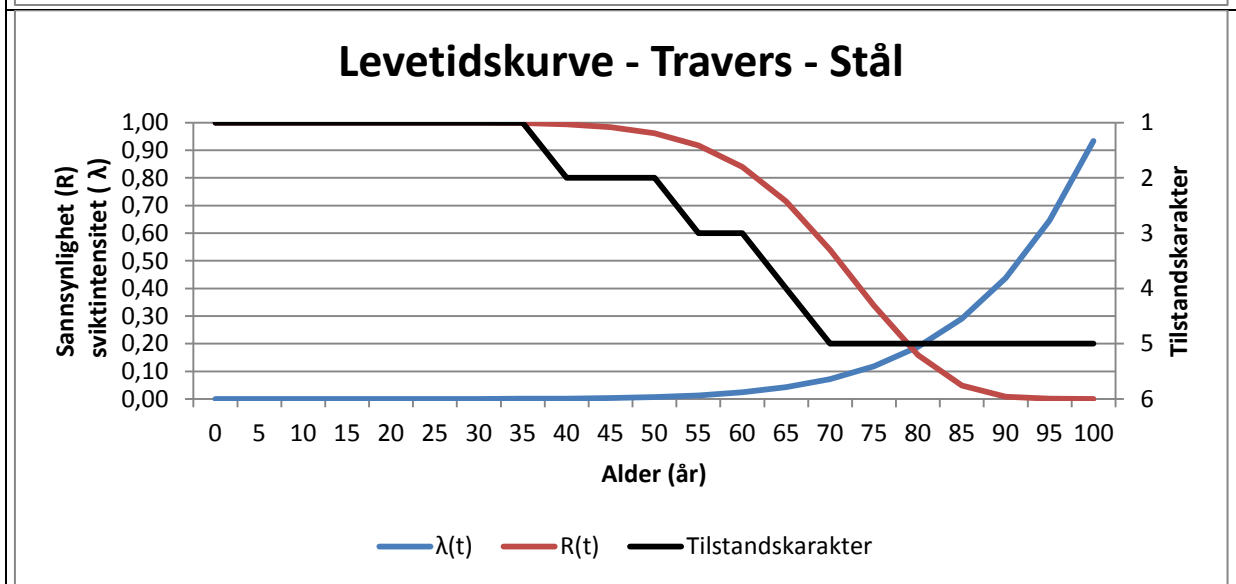
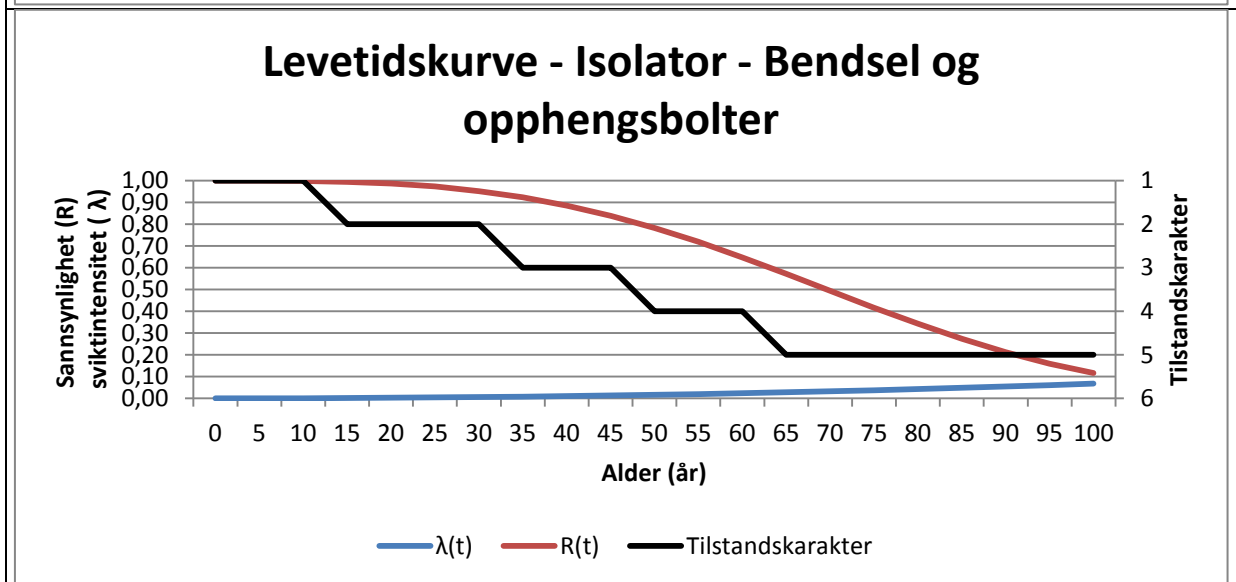
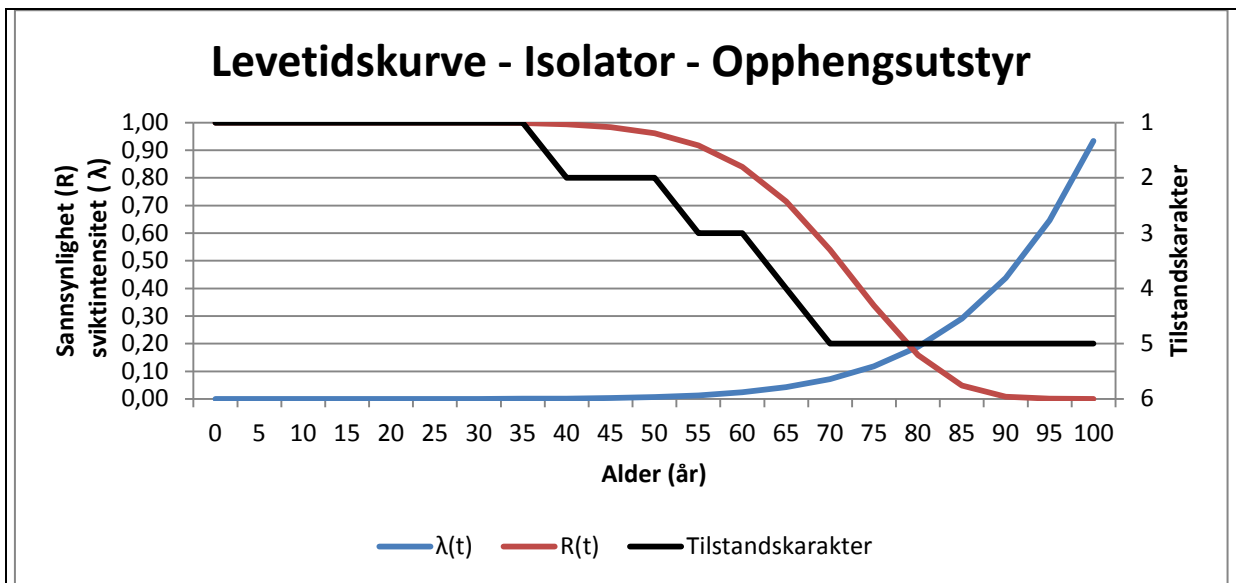
| Mast - Stag og bolter | | | | Linje - CU | | | |
|-----------------------|--------------|-------|-------------------|--------------|-------|-------------------|--|
| Alder | $\lambda(t)$ | R(t) | Tilstandskarakter | $\lambda(t)$ | R(t) | Tilstandskarakter | |
| 0 | 0,00 | 100 % | 1 | 0,00 | 100 % | 1 | |
| 5 | 0,00 | 100 % | 1 | 0,00 | 100 % | 1 | |
| 10 | 0,00 | 100 % | 1 | 0,00 | 100 % | 1 | |
| 15 | 0,00 | 100 % | 1 | 0,00 | 100 % | 1 | |
| 20 | 0,00 | 100 % | 1 | 0,00 | 100 % | 1 | |
| 25 | 0,00 | 100 % | 1 | 0,00 | 100 % | 1 | |
| 30 | 0,00 | 100 % | 1 | 0,00 | 100 % | 1 | |
| 35 | 0,00 | 100 % | 1 | 0,00 | 99 % | 2 | |
| 40 | 0,00 | 99 % | 2 | 0,00 | 99 % | 2 | |
| 45 | 0,00 | 98 % | 2 | 0,00 | 97 % | 2 | |
| 50 | 0,01 | 96 % | 2 | 0,01 | 95 % | 2 | |
| 55 | 0,01 | 92 % | 3 | 0,01 | 90 % | 3 | |
| 60 | 0,02 | 84 % | 3 | 0,02 | 84 % | 3 | |
| 65 | 0,04 | 71 % | 4 | 0,03 | 75 % | 4 | |
| 70 | 0,07 | 54 % | 5 | 0,04 | 63 % | 4 | |
| 75 | 0,12 | 34 % | 5 | 0,06 | 49 % | 5 | |
| 80 | 0,19 | 16 % | 5 | 0,08 | 35 % | 5 | |
| 85 | 0,29 | 5 % | 5 | 0,11 | 22 % | 5 | |
| 90 | 0,44 | 1 % | 5 | 0,15 | 11 % | 5 | |
| 95 | 0,65 | 0 % | 5 | 0,19 | 5 % | 5 | |
| 100 | 0,93 | 0 % | 5 | 0,25 | 2 % | 5 | |
| | | | | 0,32 | 0 % | 5 | |

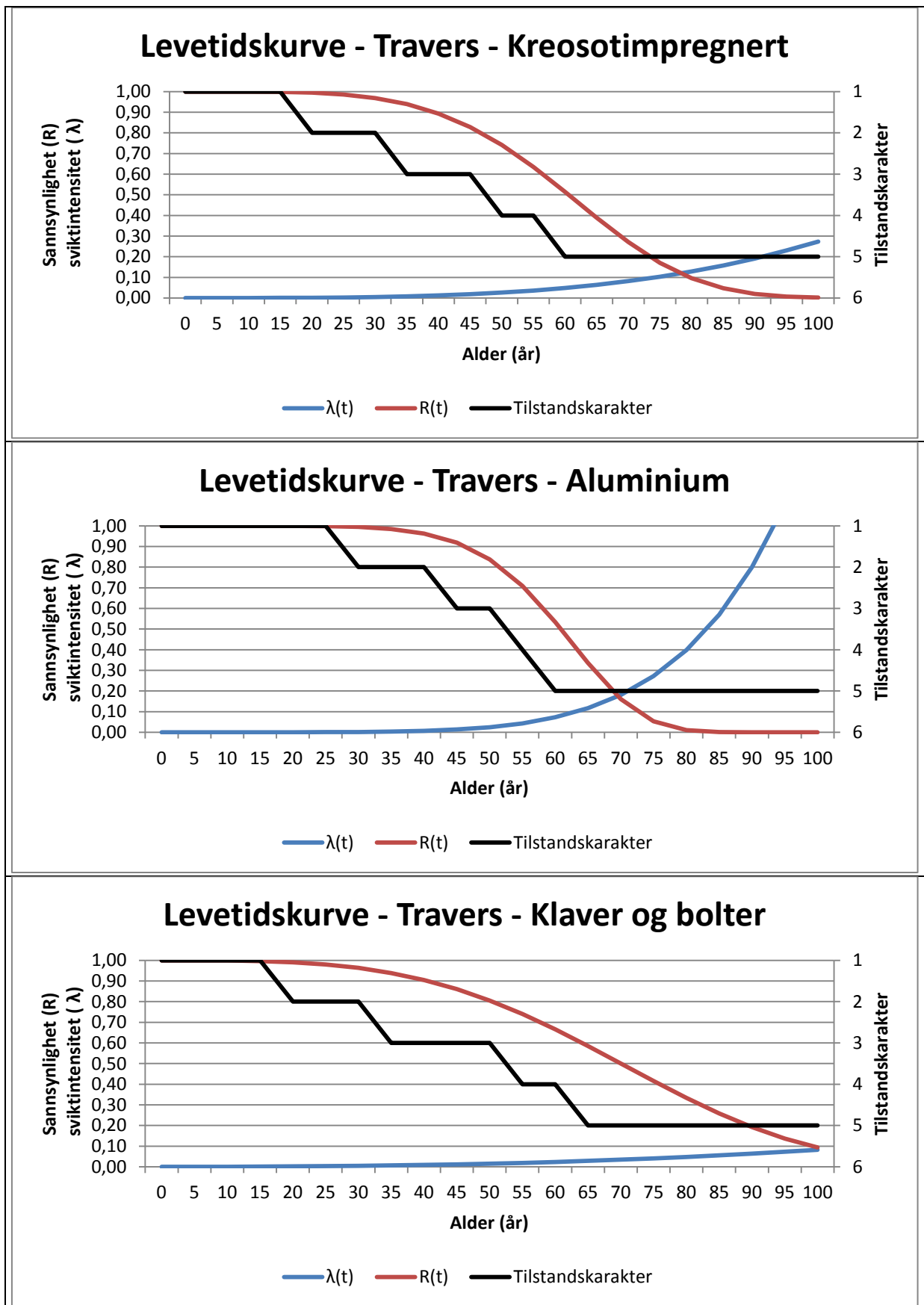
| Linje - FeAl | | | | Linje - Fe | | | |
|--------------|--------------|-------|-------------------|--------------|-------|-------------------|--|
| Alder | $\lambda(t)$ | R(t) | Tilstandskarakter | $\lambda(t)$ | R(t) | Tilstandskarakter | |
| 0 | 0,00 | 100 % | 1 | 0,00 | 100 % | 1 | |
| 5 | 0,00 | 100 % | 1 | 0,00 | 100 % | 1 | |
| 10 | 0,00 | 100 % | 1 | 0,00 | 100 % | 1 | |
| 15 | 0,00 | 99 % | 2 | 0,00 | 100 % | 1 | |
| 20 | 0,00 | 99 % | 2 | 0,00 | 100 % | 1 | |
| 25 | 0,00 | 97 % | 2 | 0,00 | 99 % | 2 | |
| 30 | 0,01 | 94 % | 3 | 0,00 | 98 % | 2 | |
| 35 | 0,01 | 90 % | 3 | 0,01 | 96 % | 2 | |
| 40 | 0,02 | 84 % | 3 | 0,01 | 91 % | 3 | |
| 45 | 0,02 | 77 % | 4 | 0,03 | 83 % | 3 | |
| 50 | 0,03 | 68 % | 4 | 0,04 | 70 % | 4 | |
| 55 | 0,03 | 58 % | 5 | 0,07 | 53 % | 5 | |
| 60 | 0,04 | 48 % | 5 | 0,11 | 34 % | 5 | |
| 65 | 0,05 | 38 % | 5 | 0,16 | 17 % | 5 | |
| 70 | 0,06 | 28 % | 5 | 0,24 | 7 % | 5 | |
| 75 | 0,08 | 20 % | 5 | 0,33 | 2 % | 5 | |
| 80 | 0,09 | 13 % | 5 | 0,46 | 0 % | 5 | |
| 85 | 0,10 | 8 % | 5 | 0,63 | 0 % | 5 | |
| 90 | 0,12 | 5 % | 5 | 0,84 | 0 % | 5 | |
| 95 | 0,14 | 2 % | 5 | 1,10 | 0 % | 5 | |
| 100 | 0,16 | 1 % | 5 | 1,42 | 0 % | 5 | |

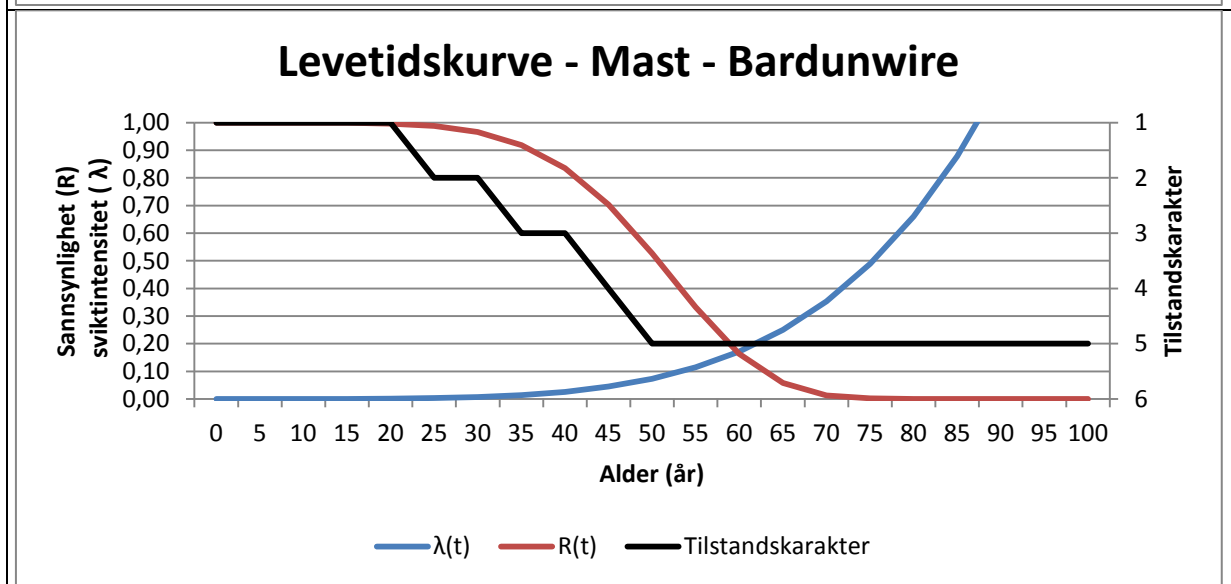
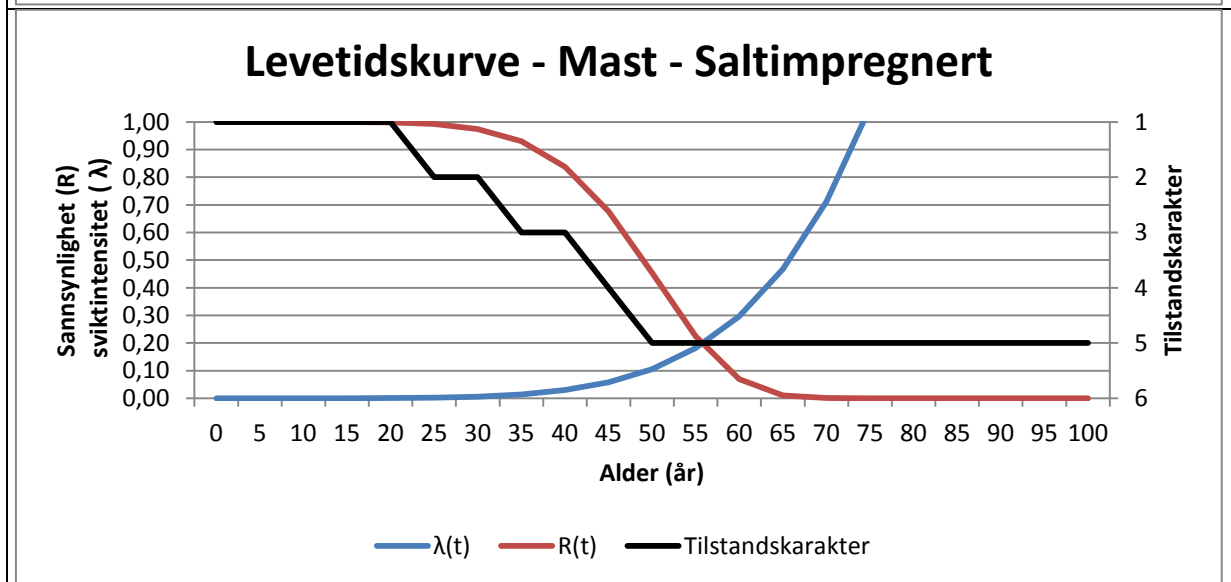
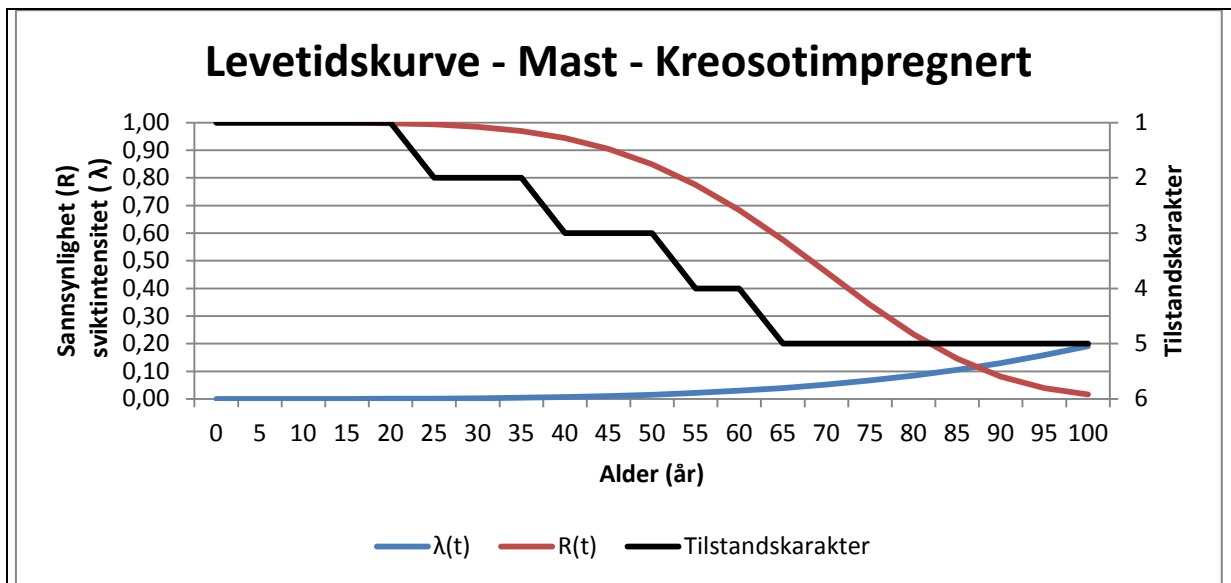
| Linje - BLX | | | | Linje - BLL | | | |
|-------------|--------------|--------|-------------------|--------------|--------|-------------------|--|
| Alder | $\lambda(t)$ | $R(t)$ | Tilstandskarakter | $\lambda(t)$ | $R(t)$ | Tilstandskarakter | |
| 0 | 0,00 | 100 % | 1 | 0,00 | 100 % | 1 | |
| 5 | 0,00 | 100 % | 1 | 0,00 | 100 % | 1 | |
| 10 | 0,00 | 100 % | 1 | 0,00 | 100 % | 1 | |
| 15 | 0,00 | 100 % | 1 | 0,00 | 100 % | 1 | |
| 20 | 0,00 | 99 % | 2 | 0,00 | 99 % | 2 | |
| 25 | 0,01 | 96 % | 2 | 0,01 | 96 % | 2 | |
| 30 | 0,01 | 91 % | 3 | 0,01 | 91 % | 3 | |
| 35 | 0,03 | 82 % | 3 | 0,03 | 82 % | 3 | |
| 40 | 0,04 | 69 % | 4 | 0,04 | 69 % | 4 | |
| 45 | 0,07 | 52 % | 5 | 0,07 | 52 % | 5 | |
| 50 | 0,11 | 34 % | 5 | 0,11 | 34 % | 5 | |
| 55 | 0,15 | 18 % | 5 | 0,15 | 18 % | 5 | |
| 60 | 0,21 | 7 % | 5 | 0,21 | 7 % | 5 | |
| 65 | 0,29 | 2 % | 5 | 0,29 | 2 % | 5 | |
| 70 | 0,39 | 0 % | 5 | 0,39 | 0 % | 5 | |
| 75 | 0,51 | 0 % | 5 | 0,51 | 0 % | 5 | |
| 80 | 0,65 | 0 % | 5 | 0,65 | 0 % | 5 | |
| 85 | 0,82 | 0 % | 5 | 0,82 | 0 % | 5 | |
| 90 | 1,03 | 0 % | 5 | 1,03 | 0 % | 5 | |
| 95 | 1,27 | 0 % | 5 | 1,27 | 0 % | 5 | |
| 100 | 1,54 | 0 % | 5 | 1,54 | 0 % | 5 | |

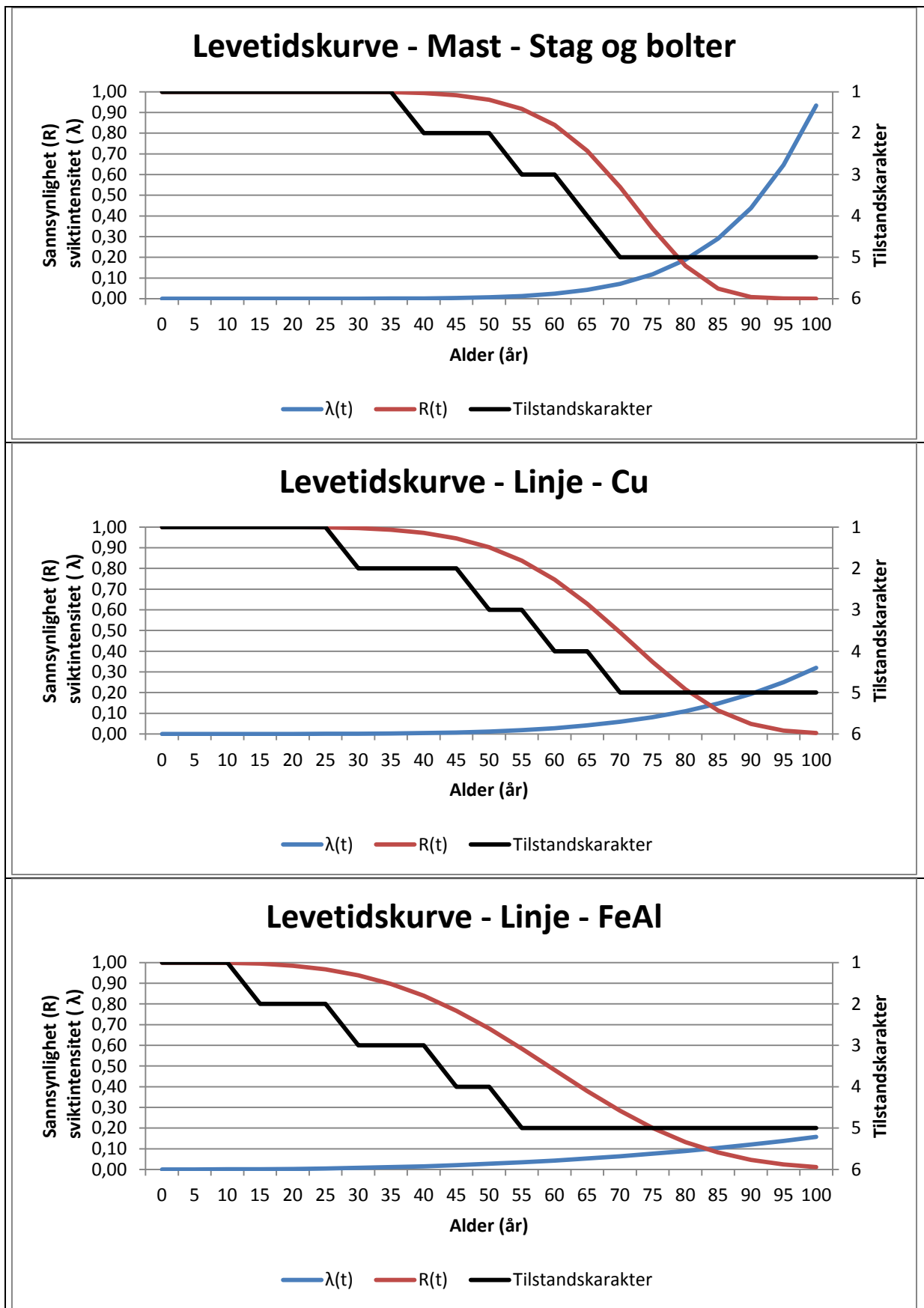
Vedlegg

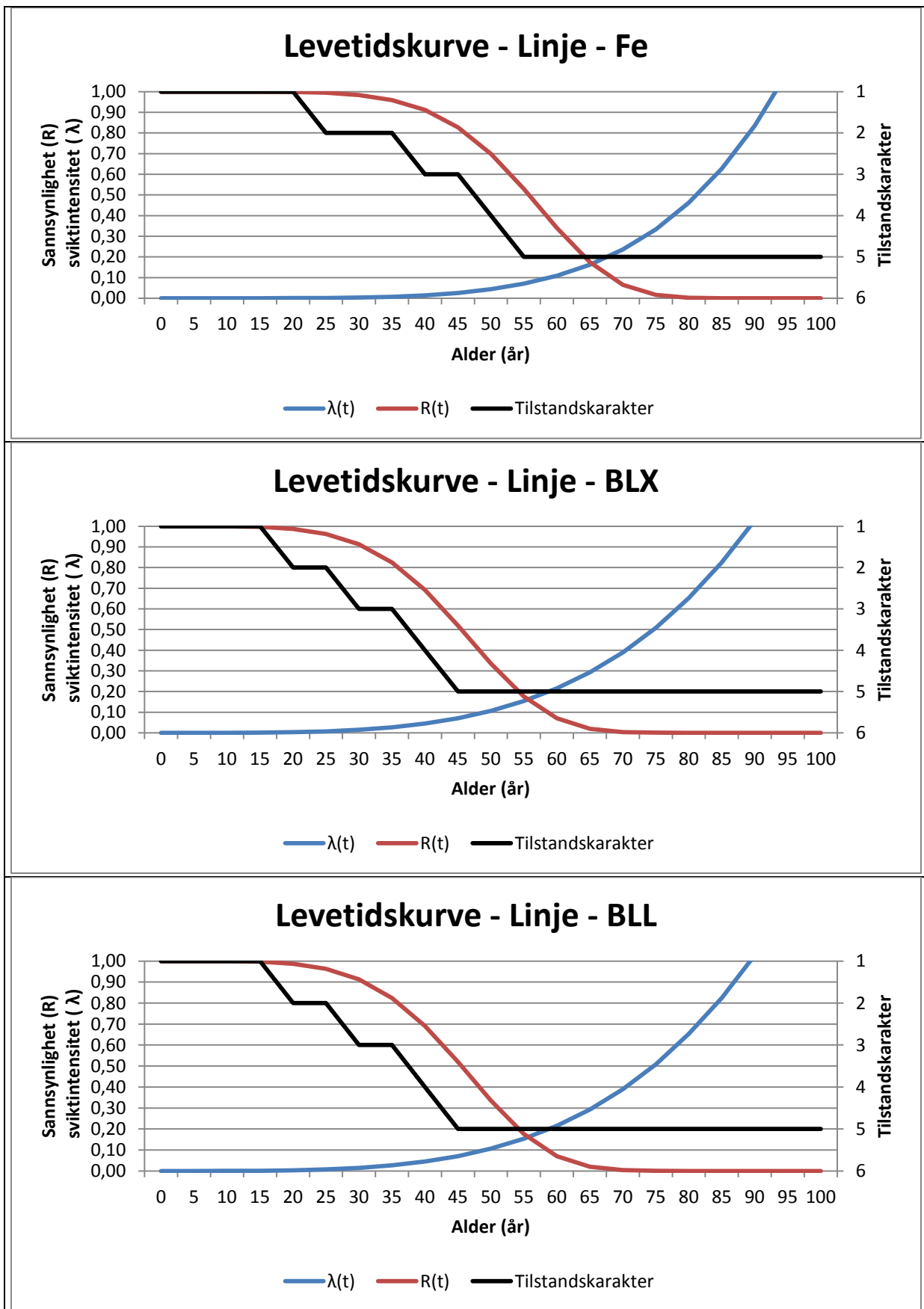












Vedlegg

