

# Klimapåkjenninger og sårbarhet i kraftnett

klimarelatert sårbarhet i norske regional- og distribusjonsnett

**Kristin Moe Elgsaas**

Master i energi og miljø

Oppgaven levert: Juni 2007

Hovedveileder: Eivind Solvang, ELKRAFT



# Oppgavetekst

Masteroppgaven omhandler anvendelse av metodikk og datagrunnlag for risiko- og sårbarhetsanalyser (ROS) i regional- og distribusjonsnett, med følgende hovedaktiviteter; beskrive analyse av sårbarhet i regional- og distribusjonsnett, beskrive aktuelle hendelser vedrørende sårbarhet knyttet til klima, beskrive aktuelle klimapåkjenninger, metodikk for sårbarhetsanalyse brukt i denne oppgaven, etablere og analysere et konkret case og vurdere potensialet for sårbarhetsanalyse i regional- og distribusjonsnett.

Oppgaven gitt: 25. januar 2007

Hovedveileder: Eivind Solvang, ELKRAFT



## **Forord**

Med denne oppgaven avslutter jeg mine år ved NTNU. Det har vært en lærerik og spennende prosess som jeg har hatt nytte av på mange plan. Forhåpentligvis står jeg nå rustet til å møte nye utfordringer.

Det er på tide å takke alle som har gjort studietiden til det den har vært, og ikke minst takke de som har bidratt til denne oppgaven med sin kunnskap og sin erfaring; Eivind Solvang, Gerd Kjølle, Bengt Øverli, Per Ådne Bergfjord og Svein M Fikke.

Dette er min Masteroppgave ved Institutt for Elkraftteknikk våren 2007.

*Kristin Moe Elgsaas*

Trondheim, juni 2007

## SAMMENDRAG

En rekke alvorlige hendelser har de siste årene ført til økt fokus på sårbarhet. Potensiell sårbarhet har fått stor oppmerksomhet i media i etterkant av for eksempel ekstremvær, store strømbrudd og terrorangrep. Også i fagmiljøer har en stilt spørsmål ved robustheten til dagens samfunn, og understreket viktigheten av en faglig evaluering av dette. Denne oppgaven tar for seg sårbarhet i kraftnettet, med spesiell fokus på sårbarhet i regional- og distribusjonsnett forårsaket av klimapåkjenninger i en norsk sammenheng.

Gjennom litteraturstudie, selvstendig tenkning, innhenting av erfaring og etablering av case søker en svar på fire grunnleggende spørsmål:

- Hva innebærer sårbarhet i kraftnettet, og hvordan kan det defineres på en hensiktsmessig måte?
- Hvordan registreres og evalueres sårbarhet i kraftnettet, og finnes det bedre måter å gjøre dette på?
- Hva har klimapåkjenninger å si for sårbarheten i kraftnettet, og hvordan kan klimarelatert sårbarhet evalueres?
- Hva er utbyttet av sårbarhetsanalyser, og hvilket potensial har de?

Oppgaven viser at sårbarhet i kraftnettet overføres til sårbarhet i samfunnet, og at fravær av forsyning gir en domino-effekt av samfunnsmessige konsekvenser. En hensiktsmessig definisjon av sårbarhet i kraftnettet bør ta hensyn til dette. Følgende definisjon foreslås:

*Sårbarhet i kraftnettet er en nedsatt funksjonsevne i dette systemet som forplanter seg til en nedsatt funksjonsdyktighet i samfunnet generelt.*

Tidligere studier viser at det finnes en rekke parametere som brukes til å beskrive sårbarhet. Avbrutt effekt, ikke-levert-energi og avbruddstid er av de mest brukte. Et poeng som understrekes i denne oppgaven er at sårbarhet er en flerdimensjonal størrelse,

og de fleste parametere kan i enkelte tilfeller gi et noe misvisende resultat. Som løsning på dette foreslås det i oppgaven at avbrudd klassifiseres ut fra parametere gitt av det rammede området uavhengig av den aktuelle hendelsen. Det utvikles som sårbarhetsindikator en grafisk fremstilling av utetid pr karakteristisk effekt og KILE pr kunde pr time. Hensikten er å sammenligne ulike hendelser i ulike områder på en hensiktsmessig måte, og å fokusere på faktisk reduksjon i samfunnets funksjonsdyktighet ved en hendelse fremfor totale kostnader.

Ved å se på aktuelle forskrifter slås det fast at det finnes faste rutiner for registrering og analyse av feilhendelser i nettet, og at et sårbarhetsbegrep er i ferd med å arbeides inn i normgrunnlaget. I forhold til sårbarhetsbegrepet brukt i denne oppgaven, finner en imidlertid svakheter ved metoden for risiko- og sårbarhetsanalyse som legges til grunn i forskrift. Det anbefales at sårbarhetsindikatoren presentert i oppgaven tas med i analysen. Dette antas å gi et samfunnsøkonomisk akseptabelt og ikke minst samfunnsmessig rasjonelt resultat som vektlegger reelt sårbarhetsreducerende tiltak.

Opgaven viser at klimapåkjenninger er svært aktuelt i et sårbarhetsperspektiv ettersom de står for en betydelig andel av avbrudd og andel ikke-levert-energi samtidig som påkjenningen selv er utenfor ens kontroll. Klimapåkjenninger kan dessuten komme inn ved flere aspekter av en hendelse. De kan være bakeforliggende, utløsende, forverrende og/eller forlengende årsaker. Metoden som anbefales og vises i denne oppgaven er en kombinasjon mellom risiko- og sårbarhetsanalyse som beskrevet i norm og sårbarhetsindikatoren presentert i oppgaven.

Opgaven viser et solid potensial for sårbarhetsanalyse. En grundig gjennomgang av kraftnettet og de eventualiteter som kan oppstå er med på å øke forståelse av systemet en er satt til å drifte, og kan være et viktig utgangspunkt for å vurdere om en har nødvendige kunnskaper, rutiner, ressurser og beredskap til å utføre oppgaven på en best mulig måte. Sårbarhetsanalyser kan også være et nyttig verktøy i forhold til å overføre og spre erfaringsbasert kunnskap.

En del arbeid står igjen i forhold til å etablere gode indikatorer og allment aksepterte metoder for sårbarhetsanalyse. Med utgangspunkt i oppgaven synes det imidlertid klart at slike analyser, og da spesielt utvidede analyser som den introduserte sårbarhetsindikatoren representerer, er et nyttig verktøy som det er verdt å videreutvikle.



# INNHOLDSFORTEGNELSE

1 Innledning .....	- 1 -
2 Sårbarhet .....	- 3 -
2.1 Kraftforsyning og sårbarhet .....	- 3 -
2.2 Samfunn og sårbarhet .....	- 6 -
2.3 Hvordan sårbarhet vurderes og håndteres .....	- 8 -
2.4 Indikatorer på sårbarhet .....	- 13 -
2.5 Oppsummering .....	- 23 -
3 Sårbarhet og klima .....	- 25 -
3.1 Eksempel .....	- 25 -
3.2 Aktuelle klimapåkjenninger .....	- 30 -
3.3 Utfallsrom. Aktuelle hendelser .....	- 39 -
3.4 Klimaendringer .....	- 42 -
3.5 Oppsummering .....	- 45 -
4 Metode .....	- 46 -
4.1 Datainnsamling .....	- 48 -
4.2 Spesifikt utfallsrom .....	- 51 -
4.3 Konsekvenser .....	- 52 -
4.4 ROS analyse .....	- 53 -
4.5 Sårbarhetsindikator .....	- 54 -
4.6 Tiltak .....	- 54 -
4.7 Evaluering .....	- 55 -
5 Case .....	- 56 -
5.1 Beskrivelse av case .....	- 56 -
5.2 Spesifikt utfallsrom .....	- 59 -
5.3 Konsekvenser .....	- 61 -
5.5 ROS analyse .....	- 63 -
5.6 Sårbarhetsindikator .....	- 70 -
5.8 Tiltak .....	- 75 -
5.9 Evaluering .....	- 76 -
6 Potensial for sårbarhetsanalyse .....	- 83 -
7 Konklusjon .....	- 86 -
Referanseliste .....	- 89 -

Vedlegg 1	ROS analyse, veiledning til norm
Vedlegg 2	Utfallsrom, kommentarer fra Statnett
Vedlegg 3	Linjetraseer, case
Vedlegg 4	Økonomiske konsekvenser, case
Vedlegg 5	ROS analyse, case
Vedlegg 6	Sårbarhetsindikator, case

## Liste over tabeller

Tabell 1	Liste over større avbruddshendelser
Tabell 2	Systemorienterte avbruddsindekser
Tabell 3	Eksempel på bruk av sårbarhetsindikator
Tabell 4	Utfallsrom for klima- og værrelaterte hendelser i kraftnettet
Tabell 5	Utfallsrom for klima- og værrelaterte hendelser i kraftnettet, forts.
Tabell 6	Endrede forutsetninger grunnet klimaendringer
Tabell 7	Lastdata
Tabell 8	Klimadata
Tabell 9	Nettdata
Tabell 10	Lastfordeling case – normal forsyning
Tabell 11	Fordeling uteblitt effekt case – redusert forsyning
Tabell 12	Seksjonering av linjenettet case
Tabell 13	Spesifikt utfallsrom case
Tabell 14	Klassifisering av sannsynlighet case
Tabell 15	Klassifisering av konsekvens case
Tabell 16	Totale økonomiske kostnader case
Tabell 17	Standard risiko matrise
Tabell 18	Risiko matrise case
Tabell 19	Vurderingsgrunnlag sårbarhet ROS-analyse case
Tabell 20	Vurderingsgrunnlag sårbarhet sårbarhetsindikator case

## Liste over figurer

Figur 1	Det norske kraftsystemet
Figur 2	Utvikling antall hendelser i det norske høyepenningsnettet
Figur 3	Utvikling i ILE i det norske høyspenningsnettet
Figur 4	Klassifisering av store avbrudd, nordisk undersøkelse
Figur 5	Grafisk fremstilling av sårbarhetsindikator
Figur 6	Sårbarhetsindikator på et område
Figur 7	Utløsende årsak 1999-2005. Antall driftsforstyrrelser 1-22 kV
Figur 8	Utløsende årsak 1999-2005. ILE pga driftsforstyrrelser 1-22 kV
Figur 9	Utløsende årsak 1999-2005. Antall driftsforstyrrelser 33-420 kV
Figur 10	Utløsende årsak 1999-2005. ILE pga driftsforstyrrelser 33-420 kV
Figur 11	Flytskjema for sårbarhetsanalyse av klima- og værpåkjenninger
Figur 12	Flytskjema datainnsamling
Figur 13	Flytskjema spesifikt utfallsrom
Figur 14	Flytskjema konsekvenser
Figur 15	Flytskjema ROS-analyse
Figur 16	Flytskjema sårbarhetsindikator
Figur 17	Flytskjema tiltak
Figur 18	Flytskjema evaluering
Figur 19	Risiko ROS-analyse case
Figur 20	Antall hendelser pr risikoverdi ROS-analyse case
Figur 21	Sårbarhetsindikator case
Figur 22	Risiko sårbarhetsindikator case
Figur 23	Risiko ROS-analyse case, avbruddshendelser markert
Figur 24	Risiko sårbarhetsindikator case, kategorisert konsekvens
Figur 25	Risiko ROS-analyse og sårbarhetsindikator

## 1 Innledning

De siste årene har sårbarheten i samfunnet blitt viet mye oppmerksomhet, og mange former for sårbarhet har blitt slått opp i media. Ikke minst gjelder dette sårbarhet knyttet til menneskeskapte trusler som datakriminalitet og terrorhandlinger. Men sårbarhet er langt mer enn slike ekstreme handlinger, og ofte vil den være mer indirekte enn åpenbare angrep på samfunnet. Denne oppgaven tar for seg sårbarhet i kraftnettet, med spesiell fokus på sårbarhet i regional- og distribusjonsnett i en norsk sammenheng.

Denne type sårbarhet begrenser seg ikke til kraftnettet. Samfunnet er sårbart i forhold til kraftforsyningen fordi endring i forsyning (i negativ forstand) i svært stor grad påvirker samfunnets evne til å løse sine funksjoner på en effektiv måte. Dagens informasjonssamfunn baseres på nærmest konstant tilgjengelighet av varer, tjenester og ikke minst informasjon – og alle disse aktivitetene er avhengige av elektrisitet. Offentlige instanser trenger det for å styre og regulere. Næringslivet trenger det for å produsere. Børser og andre finansielle institusjoner trenger det for å utføre transaksjoner. De aller fleste av oss er avhengige av elektrisitet for å utføre dagligdagse gjøremål samt opprettholde en viss komfort. Kort sagt bryter det meste som finnes av moderne infrastruktur sammen dersom strømmet forsvinner og forblir fraværende. Et område som ikke kan tilby sine innbyggere og sitt næringsliv en jevnt over pålitelig kraftforsyning kan ikke fra et realistisk ståsted antas å være konkurransedyktig i dagens globale samfunn. Sårbarhet i kraftforsyningen blir i et slikt perspektiv ekstra viktig ettersom det danner grunnlag for sårbarhet også i andre sfærer.

Tross dette finnes ikke klart etablerte og aksepterte metoder for hvordan denne sårbarheten kan evalueres på en helhetlig måte. Det er oppgavens ambisjon å gi et innspill i denne sammenheng. Dette gjøres gjennom å søke svar på fire spørsmål som oppfattes som sentrale i denne sammenheng:

- Hva innebærer sårbarhet i kraftnettet, og hvordan kan det defineres på en hensiktsmessig måte?
- Hvordan registreres og evalueres sårbarhet i kraftnettet, og finnes det bedre måter å gjøre dette på?
- Hva har klimapåkjenninger å si for sårbarheten i kraftnettet, og hvordan kan klimarelatert sårbarhet beskrives?
- Hva er utbyttet av sårbarhetsanalyser, og hvilket potensial har de?

Opgaven har tre hoveddeler:

I kapittel 2 settes sårbarhet i sammenheng med kraftnettet og en ser på ringvirkninger av denne sårbarheten i samfunnet. Tidligere forskning, normgrunnlag og vanlige sårbarhetsindikatorer presenteres. En alternativ sårbarhetsindikator utvikles og foreslås.

Kapittel 3 knytter sårbarhet opp mot klima og vær. En ser på hvilke former for værpåkjenninger som er aktuelle i forhold til kraftnettet i en norsk sammenheng, og vurderer hvilke typer hendelser som kan svekke systemets funksjonsdyktighet. Med dette som utgangspunkt etableres et generelt utfallsrom for klimarelaterte hendelser i kraftnettet.

I oppgavens tredje del presenteres på bakgrunn av de to første delene en metode for sårbarhetsanalyse (kapittel 4). Denne metoden eksemplifiseres og evalueres gjennom en case (kapittel 5).

Opgaven avsluttes med en vurdering av potensialet for slike sårbarhetsvurderinger i kapittel 6.

For å opprettholde flyten i oppgaven, er det ikke skilt ut et eget diskusjonskapittel. Denne foretas hovedsakelig i evaluering av metode i kapittel 5.9 og vurdering av potensial for slike analyser i kapittel 6.

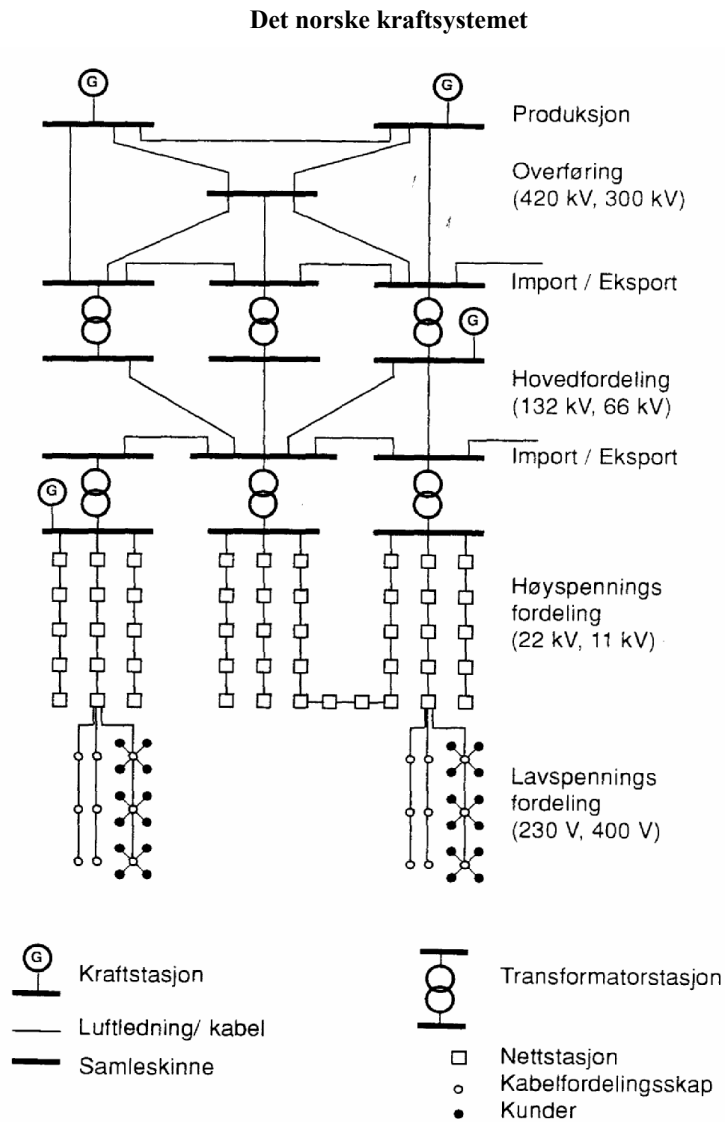
## 2 Sårbarhet

Dette kapittelet starter med en generell fremstilling av sårbarhet fra et forsyningsperspektiv. Ut fra dette søker en svar på hva sårbarhet i kraftnettet innebærer, og hvordan dette kan defineres på en god måte. De to første delkapitlene tar for seg sårbarhet med utgangspunkt i henholdsvis kraftforsyning og samfunn. Basert på dette etableres definisjonen brukt i denne oppgaven. Delkapittel 3 tar for seg tidligere forskning og aktuelle normer for å finne svar på hvordan sårbarhet i kraftnettet registreres og evalueres. Kapittelets siste del tar for seg indikatorer som brukes i sårbarhetsvurderinger, og en fremstilling som kan øke innsiktet i denne sammenheng foreslås.

### 2.1 Kraftforsyning og sårbarhet

Denne oppgaven begrenser seg til sårbarhet i regional- og distribusjonsnettene - og da forsyning i form av luftlinjer. Med regionalnett og distribusjonsnett menes henholdsvis 1-22 kV nett og 33-132 kV nett. For å sette det hele i perspektiv kan en nevne at høyspenningsnettet pr 2005 hadde en total utstrekning på 93 617 km fordelt på nivåene 1-22 kV (63 257 km) og 33-420 kV (30 360 km) [1].

Figur 1 gir en oversikt over hele det norske kraftsystemet.



Figur 1 Stilisert bilde av det norske kraftsystemet [2]

I en forstudie foretatt av Sintef beskrives sårbarhet som:

*”..et uttrykk for et systems manglende evne, eller redusert evne, til å motstå uønskede hendelser, begrense konsekvensene og til å gjenopprette funksjonene etter hendelsen” [3, s.5].*

I et nett med luftlinjer er denne manglende eller reduserte evnen til å motstå uønskede hendelser forårsaket av manglende overensstemmelse mellom styrke og påkjenning. Feilaktige dimensjoneringskriterier, lite redundans og fleksibilitet, dårlig vedlikehold, menneskelige feil og manglende sikkerhet ved drifting kan enkeltvis eller i kombinasjon forårsake avbrudd i forsyningen. En annen sak er kritiske påkjenninger (f.eks ekstreme værforhold) som ikke kan påregnes innen rimelige grenser.

Evne til å begrense konsekvensene er i likhet med evne til å motstå uønskede situasjoner knyttet til grad av redundans og fleksibilitet i nettet. Men her har en også momenter som overvåkning, vernsystemer og menneskelige faktorer som ferdigheter, øvelse og kunnskap hos operatører til å avverge og begrense uønskede situasjoner. Disse menneskelige faktorene spiller sammen med tilstrekkelige ressurser en avgjørende rolle også når det gjelder å gjenopprette tapt funksjonalitet.

Mennesker kan før, under og etter uønskede hendelser gjennomføre tiltak som øker motstandsevne, reduserer konsekvenser og letter gjenopprettelsesarbeidet. Disse preventive handlingene og handlingsmønstrene skjer imidlertid innenfor rammer som ikke nødvendigvis kan endres. I det en hendelse inntreffer vil nettopologi, samfunn og værforhold være gitt. Selv om en har tatt rimelige forhåndsregler, kan en i enkelte tilfeller rammes av omstendigheter en ikke rår over. Spesielt aktuelt kan dette være i forhold til værrelaterte hendelser. På en måte vil nettet være spesielt sårbart i møte med værrelaterte hendelser ettersom været er utenfor ens kontroll. Dette er en innebygd sårbarhet det er viktig å evaluere og være klar over.

Et eksempel på at vær kan gi yterligere komplikasjoner er hendelsen i Steigen. Nødvendige ressurser var tilgjengelig både i form av personell og materiell, men været forsinket arbeidet betraktelig. Uvær gjorde at helikoptre ikke kom opp til det rammede området. Dette er også et godt eksempel på at vær kommer inn flere steder i sårbarhets ”ligningen”; dårlig vær kan være årsak til forsyningssvikt samtidig som det kan vanskeliggjøre og forlenge arbeidet med gjenoppretting. Det kan også øke konsekvensene



ved avbrudd ettersom dårlig vær som for eksempel kulde og snøstorm gjør det vanskeligere å klare seg uten strøm.

Ettersom en aldri kan gardere seg 100% mot avbrudd vil det alltid være en viss sårbarhet knyttet til kraftforsyningen. Spørsmålet er bare hvor stor (eller snarere liten) denne kan og bør gjøres, og hvilke ressurser det er formålstjenelig å investere for å oppnå dette.

## **2.2 Samfunn og sårbarhet**

Samfunnet er sårbart på mange måter. I forhold til kraftnettet er det sårbart fordi redusert ytelse i dette systemet reduserer samfunnets tilgang på elektrisitet, og dermed dets funksjonsdyktighet. Dette problemet øker i takt med at forbruket øker og at stadig flere samfunnsoppgaver krever tilgang på elektrisitet. I løpet av perioden 1989-2005 har elektrisitetsforbruket i Norge pr innbygger økt med 7,5% og det totale elektrisitetsforbruket har økt med 17% [1]. Menneskers liv og virke blir i dagens samfunn sterkt påvirket av fravær av elektrisitet, og de negative ringvirkningene er mange.

Disse trekkene er en del av samfunnsprosesser som vanskelig kan endres eller ledes i en bestemt retning. For folk flest vil en slik utvikling bli sett på som modernisering eller fremskritt mot et mer utviklet samfunn. Sårbarhet i kraftforsyningen overføres i stadig større grad til samfunnet, og gjør samfunnet som helhet sårbart.

Fra et samfunnsmessig ståsted har sårbarhet minst to dimensjoner; (1) samfunnet er sårbart i forhold til årsaker som forårsaker manglende evne til å opprettholde funksjoner, og (2) samfunnet er sårbart som følge av konsekvensen denne nedsatte funksjonsdyktigheten får. Nettsystemet i et område kan jevnlig utsettes for påkjenninger som overgår styrken til enkelte komponenter. Frekvens av feilhendelser gjør dette området sårbart. Videre kan en i områder med pålitelige nettsystemer ha kunder som får store negative konsekvenser ved avbrudd. Disse konsekvensene gjør området sårbart.

Full forsyningssikkerhet kan aldri garanteres, og evne til å motstå og begrense konsekvenser av uønskede hendelser må i så måte også knyttes til alternative måter å holde ”hjulene” i gang. Sentralt her er UPS<sup>1</sup> for essensiell last, gode og oppdaterte beredskapsplaner, og som en siste skanse et fornuftig antall reserveaggregater. En bør se på alternative måter å utføre viktige samfunnsfunksjoner på dersom forsyningen svikter – såkalte kundeorienterte tiltak. Det er viktig med bevissthet om at avbrudd kan oppstå, og det bør i forkant avklares hvilke ressurser ulike instanser har og hvordan de kan bidra i en beredskapssituasjon. I det avbrudd oppstår og spesielt dersom de vedvarer over en periode oppstår stadig nye problemer, som en ikke nødvendigvis har sett for seg eller tenkt gjennom på forhånd.

Avhengigheten av elektrisitet gir en dominoeffekt som øker konsekvensene av avbrudd. Uten strøm vil etter hvert ikke bare fasttelefoni kobles ut, men også basestasjoner for det mobile nettet. Dette skaper problemer i forhold til kommunikasjon mellom f.eks legevakt og alvorlig syke mennesker. Pumper i kloakksystemet slutter å fungere, renseanlegg for vann stopper og bensinpumper går ut av drift. Dette gir dårlig hygieneforhold og biler som ikke vil gå. En rekke slike sekundære problemer er med på å komplisere situasjonen, øke konsekvensen og dermed sårbarheten.

Av dette ser en at nedsatt funksjonsevne i kraftnettet henger sammen med redusert evne til å levere elektrisiteten sluttbrukere ønsker – altså manglende forsyningssikkerhet. Sårbarhet i kraftnettet blir dermed et uttrykk for hvordan samfunnet påvirkes når kraftforsyningen ikke fungerer som den skal. Følgende definisjon legges til grunn i denne oppgaven:

*Sårbarhet i kraftnettet er en nedsatt funksjonsevne i dette systemet som forplanter seg til en nedsatt funksjonsdyktighet i samfunnet generelt.*

---

<sup>1</sup> Un-interruptable Power Supply

### 2.3 Hvordan sårbarhet vurderes og håndteres

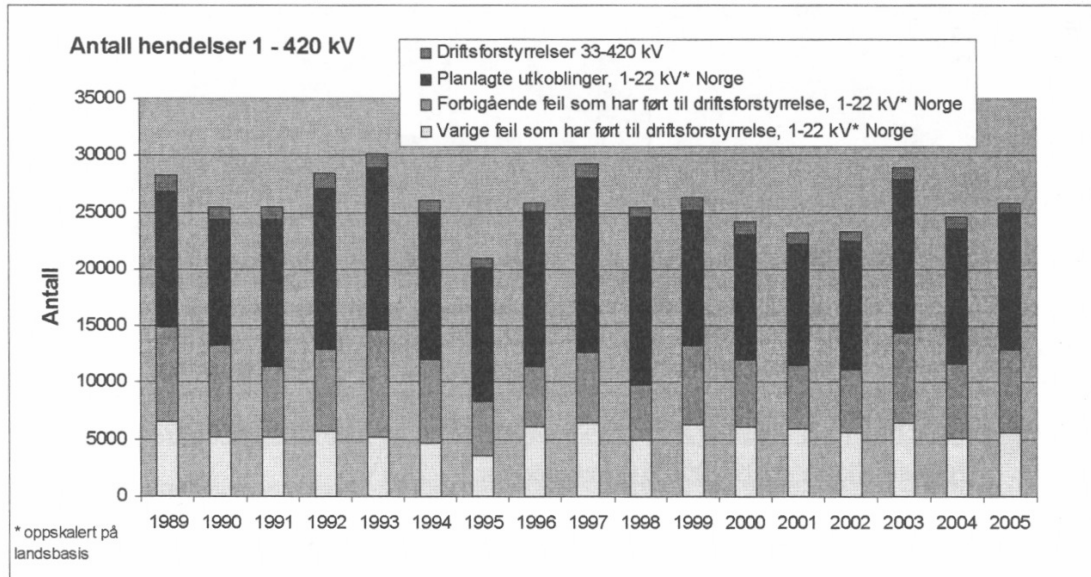
Økt fokus på sårbarhet har fått folk til å spørre seg om sårbarheten i samfunnet er økende. Kraftnettet blir stadig mer komplekst og hardere driftet, og er et av momentene som blir nevnt i denne sammenheng. Slike spekulasjoner tar som regel også utgangspunkt i de omfattende endringer en har sett i bransjen de siste tiårene. I Sintef forstudien nevnes blant annet utviklingstrekk som kan gi inntrykk av at ”..nettselskapene må forvalte et stadig større og eldre nett, med stadig færre ansatte med høy gjennomsnittsalder og mindre lokal kompetanse” [3, s 27]. Studien finner imidlertid ingen klare holdepunkter for at sårbarheten i kraftnettet faktisk er økende.

Avbruddstatistikk viser heller ikke direkte tegn til en økende sårbarhet, og Sintef studien ”Analyser av feil og avbrudd i kraftnettet 1989-2005” konkluderes det med at ”[d]e fleste variasjoner kan forklares med endringer i registreringssystemer, -rutiner, myndighetskrav og spesielle hendelser pga uvær” [1, s.79]. De siste 10 årene har antall hendelser pr år vært relativt uendret. Og ILE<sup>2</sup> har faktisk hatt en betydelig nedgang fra gjennomsnittlig 37 GWh i perioden 1989-1995 til gjennomsnittlig 23 GWh i perioden 1996-2005. I 2005 var ILE på 16 GWh [1].

---

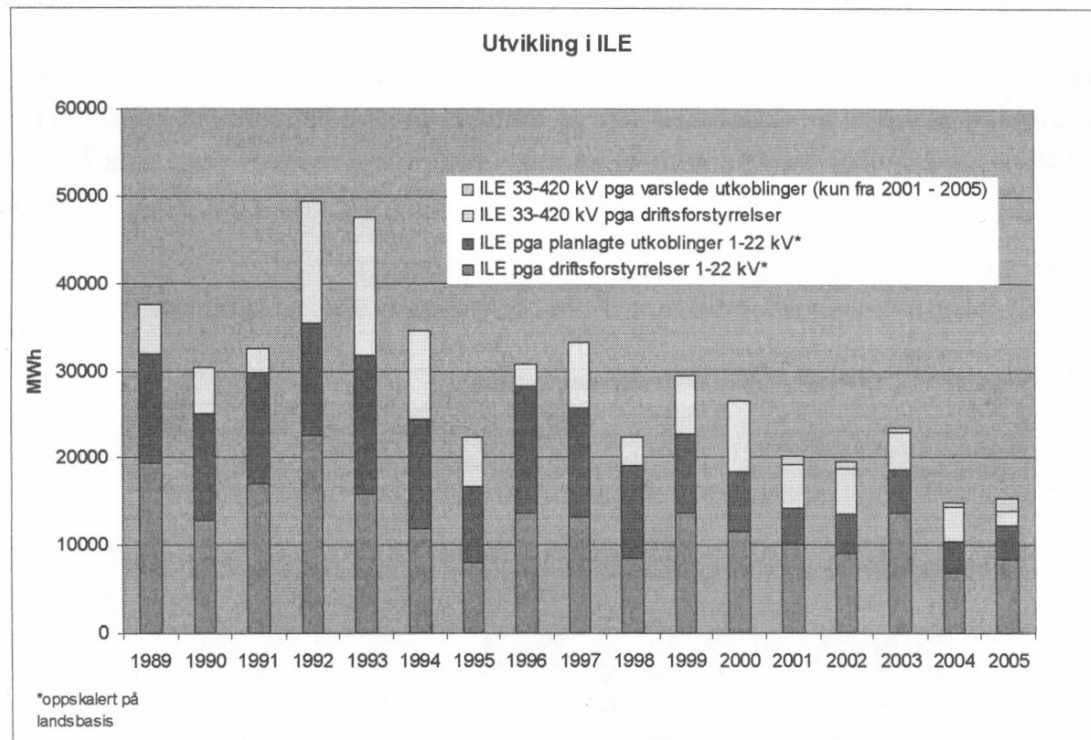
<sup>2</sup> Ikke-levert energi

Utvikling i antall hendelser i det norske høyspenningsnettet



Figur 2 Årevis fordeling av antall hendelser i det norske høyspenningsnettet for perioden 1989-2005 [1]

Utvikling i ILE i det norske høyspenningsnettet



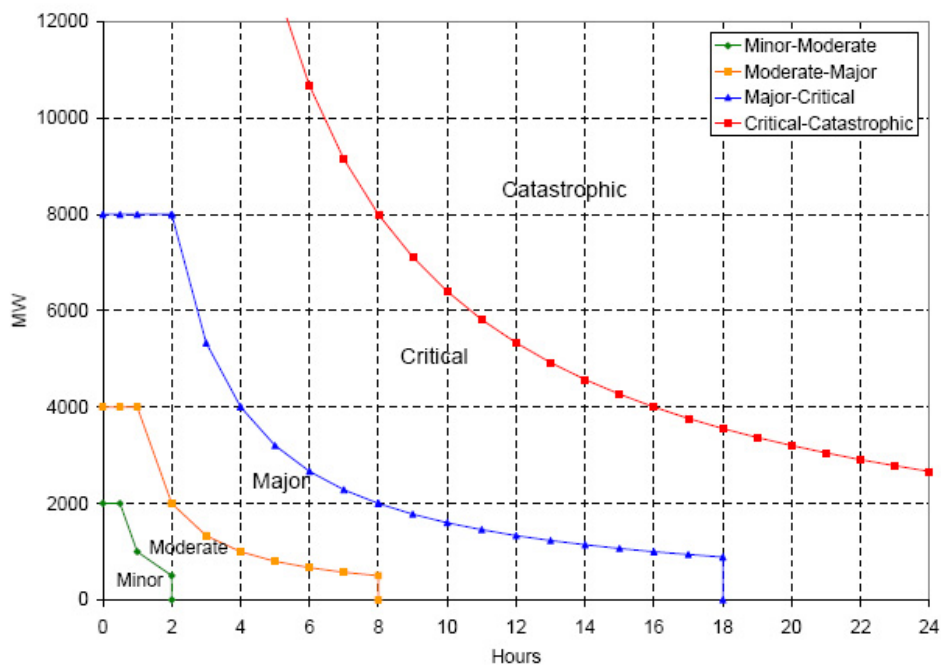
Figur 3 Årevis fordeling av ILE i det norske høyspenningsnettet for perioden 1989-2005 [1]

Sintef gav i 2004 ut en rapport der en så på sårbarhet i et nordisk perspektiv. Her heter det at sårbarhetsanalyse er:

*“..a methodical examination [...]with the objective to determine the systems ability to withstand threats and survive unwanted situations by the identification of threats, quantification of risk and evaluation of the ability to stabilize the system”*  
 [4, s.6]

Hensikten med denne studien var å identifisere sårbarheten i den nordiske kraftforsyningen, identifisere barrierer for å redusere denne, og å foreslå mulige tiltak. Grunlaget for studien var risiko analyse, og det nordiske systemet ble vurdert til å ha en medium risiko for slike avbrudd. Avbruddene ble klassifisert ut fra størrelse gitt ved avbrutt effekt og avbruddstid som vist i figur 4.

**Klassifisering av store avbrudd**



**Figur 4 Klassifisering av store avbrudd brukt i den nordiske undersøkelsen. Bruddene vurderes ut fra avbruddstid, utkopledd effekt og ikke-levert energi [4]**

I rapportens risiko matrise ble konsekvens gitt ved avbrutt energi (MWh) og sannsynlighet oppgitt i frekvens (hendelser pr år) [4].

Aktuelle forskrifter er et viktig utgangspunkt for hvordan sårbarhet registreres og evalueres. Forskriftene kan også gi informasjon om det generelle datagrunnlaget som er til rådighet for sårbarhetsvurderinger. Aktuelle i denne sammenheng er ”Forskrift om leveringskvalitet i kraftsystemet” fra 2004, ”Forskrift om systemansvaret” fra 2002, ”Forskrift om økonomisk og teknisk rapportering, ”Forskrift for beredskap i kraftforsyningen” fra 2003 og inntektsramme for nettvirksomheten og tariffer” fra 1999.

”Forskrift om leveringskvalitet i kraftsystemet” har som hensikt å ”bidra til å sikre en tilfredsstillende leveringskvalitet i det norske kraftsystemet, og en samfunnsmessig rasjonell drift, utbygging og utvikling av kraftsystemet”. I tillegg til å pålegge nettselskaper å opprettholde en viss leveringskvalitet, legger forskriften føringer for hvordan påliteligheten i eget nett skal registreres og rapporteres. Denne leveringspålitelighet er et mål på hvor sikker forsyningen er - det vil si i hvor stor grad systemet evner å levere den elektrisiteten kundene ønsker. Blant de data som årlig skal rapporteres til NVE er årsak, dato, varighet, avbrutt effekt og ILE for alle avbrudd. Et avbrudd er definert som uteblitt levering av elektrisk energi til sluttbrukere der forsyningsspenningen er under 1% av avtalt spenning [5].

Forskrift om systemansvaret skal blant annet ”..legge til rette for et effektivt kraftmarked og en tilfredsstillende leveringskvalitet i kraftsystemet”. Denne forskriften pålegger konsesjonærer å analysere driftsforstyrrelser i konsesjonærens eget regional- og sentralnett og produksjonsenheter knyttet til disse nettene [6]. Med driftsforstyrrelse menes ”utløsning, påtvungen eller utilsiktet utkobling, eller mislykket innkobling som følge av feil i kraftsystemet” [7].

Under beredskapsforskriften plikter alle enhetene i Kraftforsyningens beredskapsorganisasjon (KBO) å ”implementere et helhetlig beredskapskonsept” som skal integreres i den daglige aktiviteten, og ”optimalisere forebygging og håndtering av

alle ekstraordinære situasjoner som kan skade eller hindre produksjon, overføring og fordeling av elektrisk kraft” [8, § 1-1]. Virksomhetene omfattet av denne forskriften plikter å foreta og oppdatere risiko- og sårbarhetsanalyser. I appendix 1 beskrives gangen i en slik analyse. Dette vil heretter refereres til som tradisjonell eller standard ROS analyse.

En annen forskrift som påkrever data som kan være relevante som grunnlag for ROS analyser er ”Forskrift om økonomisk og teknisk rapportering, inntektsramme for nettvirksomheten og tariffer”. Denne forskriften skal blant annet ”..[sikre] at nettet utnyttes og utbygges på en sikker og samfunnsmessig rasjonell måte”. Denne forskriften pålegger konsesjonærer å ha et anleggsregister over alle anleggsmidler [9].

Gjennom forskrifter blir det klart at nettselskaper har en plikt til å opprettholde en akseptabel forsyningssikkerhet samt vurdere, registrere og rapportere i forhold til eget nett og hendelser i disse nettene. En del informasjon samles gjennom FASIT ordningen for registrering av feil og avbrudd i kraftsystemet. Her plikter nettselskaper med inntektsramme å gjøre registreringer i henhold til Forskrift om systemansvaret. Det som registreres i FASIT er resultat av feilanalyse ved driftsforstyrrelser. Registreringene blir behandlet og publisert i tre landsomfattende statistikker [1]:

- ”FASIT – 20xx Feil og avbrudd i høyspennings distribusjonsnett t.o.m. 22 kV” utgitt av EBL
- ”Statistikk over driftsforstyrrelser i det norske 33 – 420 kV nettet – 20xx” utgitt av Statnett SF
- ”Avbruddsstatistikk 20xx” utgitt av NVE

Det kan være hensiktsmessig å påpeke at de data nettselskapene har i dag vil være preget av at rapporteringsrutiner har blitt utvidet og vært i en innkjøringsperiode de siste årene. Antall år med standardiserte, sammenlignbare data kan dermed være begrenset.

For å sikre en pålitelig kraftforsyning også i fremtiden ble KILE<sup>3</sup> ordningen innført i 2001. Gjennom KILE justeres kraftselskapenes inntektsrammer ut fra mengde ikke-levert energi (ILE) de er ansvarlig for. Hensikten er å gi et økonomisk incentiv til å opprettholde en fornuftig leveringssikkerhet. I tillegg kan sluttbrukere få direkte erstatning ved lange avbrudd slik som i Steigen.

## 2.4 Indikatorer på sårbarhet

Sårbarhet er i denne sammenheng et uttrykk for hvordan samfunnet påvirkes når kraftforsyningen ikke fungerer som den skal. Det handler om hvilke funksjoner som slutter å fungere under hvilke forhold, hvilke konsekvenser det får, og hvordan det oppfattes av folk flest. I forstudien foretatt av Sintef pekes det på mangler når det gjelder ”gode indikatorer, målemetoder og dokumentasjonsgrunnlag” [3, s. 29] i forhold til sårbarhet i kraftnettet.

Når det gjelder indikatorer er noen av utfordringene stor variasjonsbredde og ulike karakteristiske trekk ved ulike avbrudd. Mens utfall som oppstår som følge av driftssituasjonen i nettet (”teknisk” utfall) kan omfatte mange brukere, går det relativt raskt å gjenopprette forsyningen ettersom det normalt vil være minimale fysiske ødeleggelser knyttet til slike hendelser. Ytre påkjenninger som klima og vær vil derimot som regel ha begrenset geografisk utbredelse, mens det i mange tilfeller kan ta lang tid å reparere de fysiske ødeleggelsene. Tabell 1 viser en liste over større avbrudd som understreker disse forskjellene.

---

<sup>3</sup> Kvalitetsjusterte inntektsrammer for ikke-levert-energi



**Liste over større avbruddshendelser**

<b>Hendelse</b>	<b>Størrelse</b>	<b>Varighet</b>
Steigen, januar 2007*	Lite lokalsamfunn med 1820 sluttbrukere	6 døgn
Vinterstorm i USA og Canada, 12-24 januar 2007*	Omtrent 1 millioner sluttbrukere berørt	Totalt i underkant av to uker
Vest-Europa, 4.november 2006	Mer enn 15 millioner sluttbrukere på det europeiske kontinentet	2 timer
Gudrun, januar 2005*	Mer enn 660 000 sluttbrukere	Gjennomsnittlig varighet 4 døgn, maksimal varighet 45 døgn
Italia, 28.september 2003	177 GWh ILE, stort sett hele Italia rammet	I underkant av 20 timer
Eastern Interconnection, 14. august 2003	61 800 MW utkoblet og om lag 50 millioner mennesker berørt	Full forsyning etter 4 døgn
Isstorm i Quebec, januar 1998*	1,6 millioner sluttbrukere	Maksimal varighet 4 uker
Nyttårsorkanen, januar 92*	Ca 300 000 sluttbrukere (i ulik grad)	Maksimal varighet 5 døgn

**Tabell 1** Liste over store avbruddshendelser som viser størrelse og varighet. Listen omfatter ulike typer brudd. Hendelser merket \* er værrelaterte.

Utkoblet effekt, avbruddslengde og ikke-levert-energi er enkle parametere som ofte blir brukt for å beskrive avbrudd. Disse gir selvfølgelig et inntrykk av en hendelse, men det er også svakheter knyttet til dem ettersom de ikke alltid er objektive og ikke-diskriminerende. Med objektivt menes i denne sammenheng et mål som ikke vektet en type brudd fremfor en annen type ved f.eks kun å karakterisere ut fra avbruddstid (vektlegger fysiske ødeleggelser) eller utkoblet effekt (vektlegger ”tekniske” avbrudd).

Et annet problem er at lik utkoblet effekt vil kunne gi ulike konsekvenser ettersom ulike områder har ulik kundesammensetning. Konsekvenser kan også variere i forhold til hvor stor andel av total effekt som kobles ut. Samme resonnement gjelder for avbruddstid.

Problemet med å karakterisere avbrudd ut fra ILE og kostnader er at det fins svært ulike måter (og dermed konsekvenser) å komme frem til samme resultat. Stor effekt og kort

varighet kan gi samme ILE og kostnad som lav effekt og langvarighet – mens konsekvensene av bruddene kan være svært ulike.

Ulike typer hendelser i nettet er karakterisert ved ulike parametere. Utilgjengelighet, avbruddsfrekvens, avbruddstid pr år, avbruddsvarighet og utkoblet effekt er isolert sett ikke gode indikatorer for sårbarhet da ulike typer hendelser slår ut ulikt på de ulike indikatorene, og ingen alene fanger opp alle alvorlige situasjoner. Det er et åpent spørsmål hvilke indikatorer som best representerer og beskriver sårbarhet. En ideell indikator vil være en som gir en standardisert og sammenlignbar fremstilling som kan vurderes ut fra akseptkriterier, og som i størst mulig grad gjenspeiler de påkjenninger samfunnet utsettes for. En måte å gjøre dette på er å gjøre om fra absolutte verdier i for eksempel ILE og avbruddskostnader til relative størrelser.

Sårbarhet kan forbindes med forsyningssikkerhet (fraværende sådan). Og ettersom forsyningssikkerhet gir fravær av avbrudd kan et utgangspunkt for gode sårbarhetsindikatorer være å se på ulike avbruddsindekser. Disse kan være kundeorienterte eller systemorienterte.

Kundeorienterte avbruddsindekser kan være avbrutt effekt pr år, ikke-levert energi (ILE) pr år eller antall avbrudd. ILE og avbrutt effekt kan også brukes på systemnivå. Alle disse kan som forklart ovenfor i enkelte tilfeller gi et ufullstendig bilde av sårbarhet. Eksempler på andre systemorienterte avbruddsindekser er listet opp i tabell 2.

**Systemorienterte avbruddsindekser**

Antall avbrudd veid med antall kunder	SAIFI [avbrudd/år]
Antall avbrudd veid med berørte kunder	CAIFI [avbrudd/år]
Gjennomsnittlig avbruddstid pr år	SAIDI [timer/år]
Gjennomsnittlig avbruddsvarighet	CAIDI [timer/avbrudd]
System utilgjengelighet	ASUI
System tilgjengelighet	ASAI
System-minutter	ILE referert maksimallast [minutter/år]

**Tabell 2** Liste over internasjonale systemorienterte avbruddsindekser [10]

I denne sammenheng blir system-minutter sett på som den mest interessante.

$$\text{ILE [MWh/år]} * 60 / P_{\text{maks}}$$

Hensikten med system-minutter er å muliggjøre sammenligning av systemer med ulike belastningsnivå [10].

### **Utetid for effekt**

Ved å bruke ILE for et avbrudd [MWh/avbrudd] og karakteristisk effektuttak for det utkoblede området kan dette brukes til å sammenligne hendelser i ulike områder og med ulikt effektuttak.

$$I = \text{ILE} / P_{\text{kar}}$$

Dette uttrykket gir ”utetid for karakteristisk effekt”. Med karakteristisk effektuttak menes en parameter som karakteriserer systemet uavhengig av feilhendelsen. Det enkleste vil være maksimal effektuttak<sup>4</sup>,  $P_{\text{maks}}$  eller gjennomsnittlig effektuttak,  $P_{\text{gj}}$ . Det viktige er at samme parameter brukes i alle tilfellene som skal sammenlignes. Med utkoplede område menes last knyttet til rammede forsyningspunkter. På denne måten kan en betrakte en hendelse og sårbarhet knyttet til denne med utgangspunkt i det rammede områdets forutsetninger.

Som et eksempel er utetid for effekt beregnet for to sentrale hendelser i norsk sårbarhetshistorie. Referanseeffekten som brukes her er typisk effekt for avbruddstidspunktet:

---

<sup>4</sup>  $\text{ILE}/P_{\text{maks}}$  korresponderer med ”brukstid for maksimal effekt” som brukes som mål på utnyttelsesgrad av installert effekt [11].

### Steigen, januar 2007

$$I_{\text{steigen}} = 600 \text{ MWh} / (\sqrt{3} * 66 \text{ kV} * 65 \text{ A}) = 80,7 \text{ h/avbrudd} \approx \underline{3,4 \text{ døgn/avbrudd}}$$

Et fullstendig avbrudd med ILE lik den faktiske hendelsen ville hatt denne avbruddstiden.

### Kristiansund, januar 1992

Beregninger viser at fra kl 08.00 1. januar til kl 18.00 5. januar ble det levert rundt 3 900 000 kWh til NEAS sine ca 22 000 kunder, mens 4 400 000 kWh ikke ble levert [12].

Dette gir et tilnærmet effektuttak på 78,3 MW, som igjen gir:

$$4\,400 \text{ MWh} / 78,3 \text{ MW} = 56 \text{ h/avbrudd} \approx \underline{2,3 \text{ døgn/avbrudd}}$$

Ut fra en slik vurdering blir avbruddhendelsen i Steigen vurdert til å være mer alvorlig enn avbruddet som følge av nyttårsorkanen tross i at denne rammet flere over et større område, og at orkanen i seg selv forårsaket større ødeleggelser.

En slik sammenligning forutsetter at all ILE, MW og dermed at alle typer kunder blir like hard rammet (i.e. er like sårbare) i forhold til avbrudd. En differensiering av ulike kundegrupper kan gjøres med utgangspunkt i KILE satsene. Dette vil være et uttrykk for hvilke konsekvenser manglende forsyningsikkerhet gir<sup>5</sup>. Ofte brukes totale kundekostnader (KILE basert på total ILE) i en slik sammenheng. Denne verdien vil i stor grad avhenge av avbruddstid som en allerede har tatt hensyn til i utetid for effekt. Derfor har en her valg å bruke KILE pr kunde pr time. Denne verdien gir et bilde av hvilke lasttyper som kobles ut og er dermed et mål på hvor store kostnader et område har ved avbrudd relativt til andre områder. Kombinasjonen utetid for effekt og KILE pr

---

<sup>5</sup> Dette er selvfølgelig avhengig av at KILE kostnadene er et godt mål på de faktiske og totale (ikke bare rent økonomiske) kostnadene ulike sluttbrukere opplever i forbindelse med forsyningsbrudd.

kunde pr time foreslås i oppgaven som en måte å registrere sårbarhet på. Den vil heretter bli referert til som sårbarhetsindikatoren og brukt videre i denne oppgaven.

KILE pr kunde pr time sier ikke direkte noe om de faktiske kostnadene som påløper i området som følge av hendelsen. Men det sier noe om hvor viktig forsyningsikkerhet er i dette området, og hvor viktig den er relativt til andre områder. Verdien representerer på en forenklet måte de funksjoner som opphører å fungere i samfunnet og konsekvensene av dette. I teorien kan en tenke seg et område bestående utelukkende av ”handel og tjenester”. Dette området ville fått verdien 103,3 NOK. Et område med utelukkende husstander ville fått verdien 8,8 NOK. Med dette som eneste utgangspunkt ville dermed området ”handel og tjenester” vært nærmere 12 ganger mer sårbart enn husstandene – alle andre forhold antatt like.

Sårbarhetsindikatoren skiller sluttbrukerkostnader (representert ved KILE) fra ”interne nettkostnader” til reparasjon, material og ekstra bemanning. Beslutninger tatt ut fra dette vurderingsgrunnlaget gir ikke nødvendigvis samfunnsøkonomisk optimalitet i begreps strengeste forstand. Men ut fra sårbarhetsperspektivet lagt til grunn i denne oppgaven, med fokus på samfunnets funksjonsdyktighet, er det heller ikke dette som er hensikten med en slik sårbarhetsanalyse. I den grad en slik analyse skal være praktisk anvendelig (og dermed ha nytte utover et rent teoretisk perspektiv) vil en imidlertid måtte ta et visst hensyn til de totale kostnadene ved ulike hendelser. Et nettselskap må gardere seg mot ødeleggende kostnader selv om de ikke i første omgang gir kundeavbrudd og dermed nedsatt funksjonsdyktighet i samfunnet. En vurdering der et slik sluttbrukerfokus inngår, kan imidlertid øke samfunnshensynet og gi en samfunnsøkonomisk akseptabel og ikke minst samfunnsmessig rasjonell håndtering av sårbarhet. Begrepet ”samfunnsmessig rasjonell” brukes også i forskrifter knyttet til utbygging og drifting av nett. Det finnes flere eksempler på at selskaper lar andre hensyn gå foran økonomi. Eksempelvis betales det etter Steigen-tilfellet ut erstatning til alle kunder uten at de trenger å be om det. Det finnes også eksempler der selskaper velger å ikke kreve anleggsgebyr selv om de i følge forskrift kan gjøre dette. Der tradisjonell ROS analyse ser på totale kostnader ser en med en slik sårbarhetsindikator på hvilke kostnader som påføres sluttbrukere, og dermed

hvilken sårbarhet som direkte er knyttet til en hendelse. Kostnader som distribueres ut blant eiere i form av redusert utbytte eller sluttbrukere i form av økt nettleie antas ikke å redusere samfunnets funksjonsdyktighet.

Ved å korrigere for forskjeller i utkoblet effekt og type utkoblet last kan ulike hendelser sammenlignes i forhold til alvorlighetsgrad. Dette sier noe om i hvor stor grad samfunnet påvirkes av hendelsen og dermed hvor sårbart samfunnet er ovenfor denne hendelsen.

Sett at en ved to ulike hendelser får avbrudd som resulterer i ILE på 9 MWh. For begge tilfellene er det et effektuttak rundt 3 MW som kobles ut i en tretimers periode. I det første tilfellet rammes et handelssentrum av fullstendig strømbrudd i tre timer. I det andre tilfellet er det enkelte deler av en større område bestående av stort sett private husholdninger, jordbruk og tungindustri. Også disse mister strømmen i 3 timer. Til tross for at både tid og størrelse er lik, må en kunne regne med større konsekvenser i det første tilfellet. For det første vil kundene i tilfelle 1 ha større avbruddskostnader enn kundene i tilfelle 2, samtidig som område 1 fullstendig mister forsyningen mens område 2 bare delvis mister forsyningen. I det siste tilfellet må en kunne anta at prioritert forsyning opprettholdes, og at negative konsekvenser dermed reduseres. Dette tar indeksen høyde for på følgende måte:

#### Eksempel på bruk av sårbarhetsindikator

	ILE [MWh]	Midlere effektuttak [MW]	KILE pr kunde pr time <sup>6</sup> [kr/MWh]
Tilfelle 1	9	3,5	65,4
Tilfelle 2	9	4,5	11,8

**Tabell 3** Tabellen viser viktige karakteristikk for to avbruddstilfeller. Eksempel illustrerer fordelene ved bruk av utetid for effekt.

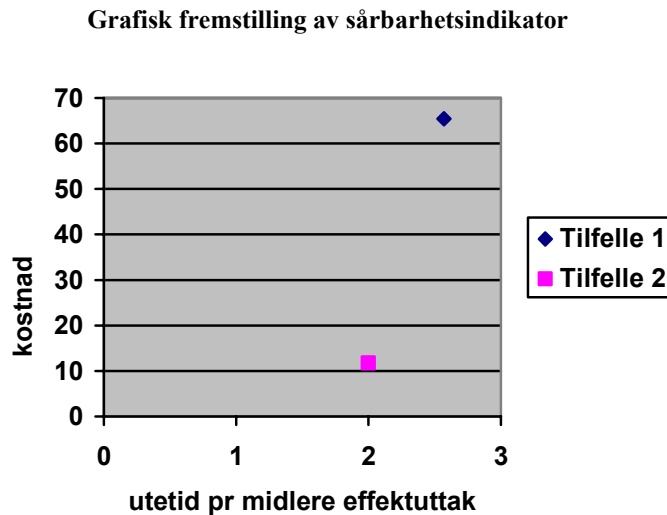
**Gjennomsnittlig KILE for tilfelle 1 er basert på 40% handel og tjenester, 30% industri, 10% offentlig virksomhet og 20% husholdning. Tilfelle 2 er basert på 20% kraftintensiv industri, 30% jordbruk og 50% husholdning**

<sup>6</sup> Finnes med å multiplisere andel av en gitt kategori med KILE kostnader for denne kategorien og så summere. Eks for tilfelle 1: Industri – 30%, handel og tjenester – 40%, Treforedling og kraftintensiv industri – 0%, Offentlig virksomhet – 10%, Jordbruk – 0%, Husholdning – 20%. Dette gir:  $(0,3 \cdot 69,9) + (0,4 \cdot 103,3) + (0,1 \cdot 13,4) + (0,2 \cdot 8,8) = 65,39$  MWh

$$I_1 = (3 \cdot 3) \text{MWh} / 3,5 \text{MW} = 2,57 \text{ h/hendelse}$$

$$I_2 = (3 \cdot 3) \text{MWh} / 4,5 \text{MW} = 2 \text{ h/hendelse}$$

Som gir:



**Figur 5 Grafisk fremstilling som viser forskjell i sårbarhetsindikator for to tilfeller med lik utkoblet effekt, lik avbruddstid og dermed lik ILE**

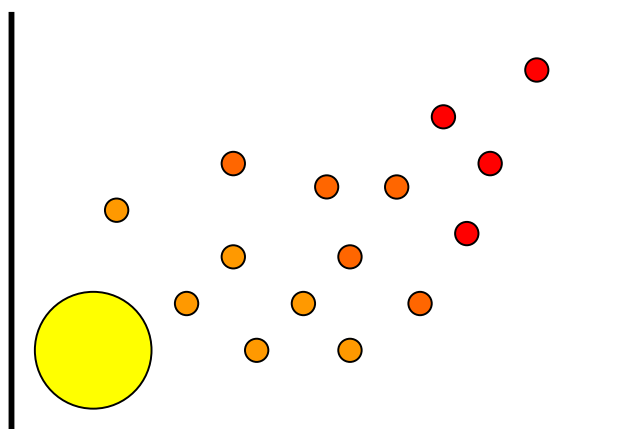
Her ser en at tilfelle 1 kommer klart verst ut. På denne måten kan en sammenligne ulike hendelser i et sårbarhetsperspektiv.

I motsetning til ordinær ROS analyse (basert på veiledning til norm) gir denne indikatoren et inntrykk av hvilken faktor som skaper konsekvensen. Det er lettere å se hva det er som gjør samfunnet sårbart (lang avbruddstid, stor effektutkobling eller utkobling av viktig last) og dermed hvilke tiltak som er mest hensiktsmessig.

En av fordelene som trekkes frem ved standard ROS analyse er økt forståelse gjennom prosessen med å etablere risiko matrisen. Hvilken type konsekvens som ligger bak de ulike risikoene i et gitt tilfelle forsvinner imidlertid fort for utenforstående som ser resultatene. Sårbarhetsindikatoren gir et bedre bilde av hvordan disse konsekvensene skapes, og øker læringsverdien i forhold til andre relevante parter som ikke deltok direkte i analyseprosessen.

Som vist er sårbarhetsindikatoren en hensiktsmessig måte å sammenligne ulike brudd i ulike områder. Den kan også brukes på et bestemt område. Ved å se på et område istedenfor på enkelthendelser kan sårbarhetsindikatoren beregnes for aktuelle hendelser og plasseres i et koordinatsystem tilsvarende figur 5. Størrelse på områdene kan gi en indikator for sannsynligheten for at hendelsen inntreffer. I normen foreslås statistikk, erfaring og systemets tilstand som utgangspunkt for å anslå disse sannsynlighetene.

Sårbarhetsindikator på et område



**Figur 6** Sårbarhetsindikatoren for aktuelle hendelser i et tenkt område. Aksene representerer det samme som i figur 5; x-aksen viser utetid pr effekt og y-aksen gir KILE pr kunde pr time. Størrelsen på sirklene indikerer sannsynlighet for at hendelsen skal inntreffe, og farge er en tenkt indikasjon på hvor akseptable hendelsen er. Alvorlighetsgraden får fra gul til rød.

I det tenkte tilfellet over representerer sirklene ulike hendelser og sirkelarealet sannsynlighet for at de inntreffer. Fargen indikerer alvorlighetsgrad. Slike figurer kan deles inn i ulike "aksept-soner" på samme måte som risiko matrisen.

Det vil også være mulig å utvide til en tredimensjonal representasjon ved å legge til en z-akse. Flere dimensjoner enn det vil få et stort abstraksjonsnivå. Andre momenter det kan være verdt å se på i forhold til sårbarhet kan være total utbredelse (størrelse på rammet område), hvor det skjer (klimatiske forhold) og når det skjer (sommer-vinter, dag-natt).



En slik fremgangsmåte vurderer hendelser ut fra områdets egne forutsetninger. En sier ikke direkte noe om de faktiske verdiene ved hendelser (totale økonomiske kostnader, ILE osv – dette kan en imidlertid lett finne ved å multiplisere opp med parametere for den spesifikke hendelser). Innbyrdes plassering sier noe om alvorlighetsgrad. En tenkt hendelse som plasserer seg lenger opp og til høyre i forhold til en virkelig hendelse vil få større konsekvenser enn en hendelse nærmere origo. Hendelser i origo gir ingen konsekvenser for samfunnet (i denne sammenheng representert av sluttbrukere av elektrisitet).

Der ROS analyse søker å representere totale samfunnsøkonomiske kostnader, fokuserer denne representasjoner som sagt på de direkte kostnader og ulemper samfunnet opplever. En mulig svakhet er at denne sårbarhetsindikatoren ikke sier noe om utbredelse av hendelsen – det vil si hvor stort område som rammes. Dette er en svakhet i den grad et område med fullstendig utkoblet effekt på 20 MW får større konsekvenser enn et område med fullstendig utkoblet effekt på 10 MW, og dersom 10 utkoblede MW av totalt 20 MW gir større konsekvenser enn 5 utkoblede MW av totalt 10 MW. Videre er den avhengig av at KILE er et godt mål på de konsekvensene sluttbrukere faktisk opplever. Andre momenter som vil kunne påvirke sårbarheten er hvor avbruddet skjer (geografi og klima kan være bestemmende for hvor alvorlige konsekvensene blir) og tidspunkt (ulike typer laster dominerer til ulike tider).

### **Liv, helse og omdømme**

I tillegg til økonomi anbefales det at ROS analysen tar hensyn til omdømme, liv og helse i konsekvensvurderingen.

I forhold til omdømme vil dette i større grad en ved ordinær ROS analyse reflekteres direkte. Omdømme vil ofte være en konsekvens av kunders belastning, og dette vises bedre ved sårbarhetsindikatoren ettersom utgangspunktet er kunders kostnader fremfor totale kostnader. Når det gjelder omdømme kan en imidlertid med utgangspunkt i definisjonen på sårbarhet brukt i denne oppgaven spørre seg hvor relevant dette

perspektivet er i en sårbarhetsvurdering. Ettersom det ikke direkte påvirker samfunnets funksjonsdyktighet velger en å se bort fra nettselskapers omdømme i resten av oppgaven.

Fare for liv og helse vil være et resultat av nedsatt funksjonsdyktighet i samfunnet, og dette må dermed tas med i en sårbarhetsanalyse. Et alternativ til den kategori-baserte metoden som brukes i ROS analysen, kan være å etablere av absolutte kriterier for hva som er uakseptabelt. I denne sammenheng vil det være aktuelt dra inn instanser som helsepersonell og beredskapspersonell for så å foreta en totalvurdering av hvert enkelt tilfelle. Ved å svare på spørsmål som; hvor lang utetid sårbare sluttbrukere tåler og hvor forsyningsbrudd er uakseptabelt (f.eks sykehjem), kan en finne mulige scenarioer som ikke kan aksepteres. Disse kan fargemerkes i grafen, og må endres så fort som praktisk mulig. Denne fremstillingen er mer svart-hvit enn kategoriene i ROS analysen. Det må kunne stilles spørsmål ved fruktbarheten av gradsvurderingen av liv og helse brukt i tradisjonell ROS-analyse. Verdien av liv og helse kan vanskelig fastslås, og en kan se for seg tilfeller der inndeling i kategorier avgjør vurderingen istedenfor faktiske konsekvenser.

## 2.5 Oppsummering

I dette kapittelet har en sett på hva sårbarhet i kraftnettet innebærer, og hvordan den kan og bør registreres og evalueres. Sårbarhet i kraftnettet ble definert til *en nedsatt funksjonsevne i kraftnettet som forplanter seg til en nedsatt funksjonsdyktighet i samfunnet generelt*. En har også sett at det i stadig større grad blir lagt vekt på sårbarhetsbegrepet, men at det ikke finnes noen etablert metode for hvordan denne skal vurderes og håndteres på best mulig måte. Det fins mange mulige måter å karakterisere avbrudd og sårbarhet på, og et bidrag som presenteres i denne sammenheng er sårbarhetsindikatoren i delkapittel 2.4. Denne indikatoren vektlegger nedsatt funksjonsdyktighet i samfunnet gitt ved konsekvenser for sluttbrukere, og søker dermed å bidra til en samfunnsrasjonell evaluering av sårbarhet. I tillegg til å vise sårbarheten til potensielle hendelser innenfor et bestemt område gir den tre hovedbidrag i forhold til tradisjonell ROS analyse:

- Et korrigert sammenligningsgrunnlag for utfall i områder med ulikt effektuttak og ulik kundesammensetning
- Den viser hvilke faktorer som skaper konsekvensene og dermed hvilke tiltak som kreves
- Gir et mer sluttbrukerfokusert perspektiv og er dermed en bedre beskrivelse av hvordan samfunnet opplever hendelsen samtidig som den fokuserer på de konsekvenser som er mest relevante i et sårbarhetsperspektiv.

## 3 Sårbarhet og klima

Dette kapittelet knytter sårbarhet opp mot klima. Spørsmålet som forsøkes besvart er hva klimapåkjenninger har å si for sårbarhet i kraftnettet. For å finne svar på dette må en se nærmere på denne type hendelser, og bestemmer hvilke type påkjenninger som er aktuelle i norske regional- og distribusjonsnett. Først i kapittelet presenteres eksempler fra virkeligheten, før begrepene klima og vær defineres og aktuelle værpåkjenninger presenteres. Deretter utarbeides en liste over aktuelle hendelser i denne sammenheng. Kapittelet avsluttes med en diskusjon rundt klimaendringer og hvilken betydning dette kan få for sårbarheten i det norske kraftnettet. I de neste hovedkapitlene blir dette konkretisert gjennom etablering av en metode i kapittel 4 og eksemplifisert gjennom en case i kapittel 5.

### 3.1 Eksempel

Under presenteres eksempler på hvor hardt kraftforsyningen (og dermed samfunnet) kan rammes av ekstremt vær, og hvor sårbar den er i møte med slike naturkrefter. Hendelsene som er valgt ut er uværet som lammet Steigen i januar 2007, stormen Gudrun som for over Sør-Sverige i januar 2005 og orkanen som rammet Nord-Vestlandet i januar 1992.

#### Steigen, 25.-30. januar 2007

Dette er et godt eksempel på at vær ikke bare er årsak til hendelser, men også kompliserer hendelsesforløp og øker konsekvensene. Torsdag 25. januar 2007 førte uvær til at 3 master i hovedlinjen inn til Steigen brøt sammen. Reserverlinjen tålte ikke strømbelastningen, og dermed mistet de fleste av Steigens rundt 2700 innbyggere strømforsyning [13]. Mange steder forsvant også fasttelefoni med strømmen.

Dårlig vær gjorde at helikopter som trengtes for å gjenopprette forbindelsen ikke kom seg opp i det rammede område. Først på ettermiddagen tirsdag 30. januar kom strømmen tilbake. Til sammen tok det 6 døgn før normal forsyning av gjenopprettet[14].



**Bilde 1 Hoveforsyningen inn til Steigen i etterkant av uværet i slutten av januar 2007 [14]**

Reservelinjen som skulle sikre forsyning til Steigen var spenningsatt, men hadde ikke vært lastsatt siden 2005. Siste toppbefaring linjen var så langt tilbake som i 1993/94. Da belastning ble overført fra den ødelagte hovedlinjen til reservelinje oppstod en rekke feilsituasjoner. Blant annet brant det flere steder ved ca 70 A (28% av oppgitt maksimal overføringsevne på 250 A) og det ble besluttet at linjen maksimalt skulle driftes ved 35 A (14% av oppgitt kapasitet). NVE har varslet et overtredelsesgebyr på om lag 3 mill NOK i etterkant av hendelsen ettersom de mener det er overveiende sannsynlig av reservelinjen ikke var i forskriftsmessig stand i forkant av hendelsen [15].

Etter hvert ble innbyggerne delt inn i seks soner som fikk to timer med strøm fra reservelinjen to ganger i døgnet. Skoler, barnehager og rådhuset var stengt, mens andre viktige institusjoner som syke- og aldershjem fikk strøm fra aggregat [14]. Aggregatene kom fra kommunen selv, sivilforsvaret og forsvaret. Etter en periode med hard belastning begynte imidlertid flere av aggregatene å svikte [13].

95% av Steigens befolkning kom seg fint gjennom den strømløse tiden [13], men konsekvensene av bruddet var likevel mange. Negative konsekvenser for innbyggerne i Steigen var blant annet at bønder måtte helle ut melk som de ikke fikk produsert etter hygienekravene, butikker måtte kaste mat, mange arbeidsplasser måtte stenge, renseanlegg for vann sviktet og det samme gjorde bensinpumper. Innseiling til havnen ble liggende mørklagt under hele avbruddet [14].

I etterkant av bruddet gikk ansvarlig nettselskap ut og sa at alle rammede kunder ville få utbetalt 6600 NOK til de rammede kundene med utgangspunkt i § 9A-2 i “Forskrift om økonomisk og teknisk rapportering, inntektsramme for nettvirksomheten og tariffier” [14]. Dette kommer på om lag 10 mill NOK og kommer i tillegg til ca 15 mill NOK i KILE kostnader og de anslagsvis 3 mill NOK i overtredelsesgebyr [15]. Nettselskapet har videre uttalt at de umiddelbart starter arbeidet med å styrke linjenettet til Steigen [14].

### **Gudrun 2005**

I januar 2005 forårsaket stormen Gudrun store ødeleggelser i Sør-Sverige. Stormen hadde en beregnet returtid på 80 år, og det som skilte den fra tidligere stormer var det store området som ble truffet [16]. Kraftnettet ble hardt rammet både direkte av de sterke vindkastene og av trær som falt inn over linjer og installasjoner. Flere enn 660 000 sluttbrukere mistet strømmen mens det hele stod på. Rundt halvparten av disse fikk strømmen tilbake i løpet av det første døgnet, men gjennomsnittlig avbruddstid lå på 4 døgn. Enkelte måtte vente i hele 45 dager på å få strømmen tilbake, og totalt hadde en hele 2,3 mill avbruddsdøgn. Total ikke-levert energi beløp seg til 111 Gwh. Startfasen av gjenoppbyggingsarbeidet ble vanskeliggjort av at også fasttelefoni og mobiltelefoner ble slått ut.

Behov for arbeidskraft og materiell oversteg klart det som var tilgjengelig i området, og forsyninger måtte hentes inn både fra andre deler av Sverige og fra andre europeiske land. En rekke organisasjoner og instanser utenfor kraftbransjen bidro i arbeidet med å gjenopprette forsyningen. Blant annet satte det svenske forsvaret i gang den største operasjonen fredstid noen sinne [17].

Lokalnettene ble generelt hardere rammet enn regionalnettene som stort sett ble reparert i løpet av 24 timer. Tre-sikrede regionalnett ble kun i begrenset grad berørt av stormen. Dette tilskrives først og fremst bredden på traseene [17]. Problemer her oppstod i første rekke som følge av trær som knakk og fløy inn i ledningene. Totalt ble 30 000 km luftledning skadet hvorav om lag 9% praktisk talt måtte bygges på nytt [18].

Et problem i forhold til rask gjenopprettelse var at det ikke fantes noe register over tilgjengelige aggregater og at aktørene selv måtte lete opp disse. Et annet problem i den forbindelse var at de aggregatene som fantes ikke alltid var tilpasset behovet som oppstod. En del aggregater gikk i stykker fordi de ikke var beregnet på døgndrift over lengre tid [17].

Spredning av informasjon til kunder var problematisk både fordi de mest naturlige kommunikasjonsmidlene var ute av drift og fordi kundeseksjonene i mange tilfeller ble satt på sidelinjer ettersom fokus var rettet mot å få opp igjen nettet så raskt som mulig [17].

Tross store ødeleggelser kunne det gått mye verre. Mildvær gjorde det lettere for folk å klare seg uten strøm, samtidig som de store tettstedene i utstrakt grad beholdt strømforsyningen eller fikk den raskt tilbake.

### **Nord-Vestlandet januar 1992 – Nyttårsorkanen**

1. januar 1992 ble norskekysten fra Sogn og Fjordane og nordover til Helgeland rammet av en orkan som enkelte steder var oppe i 50 m/s. I en periode på 15 timer ble det registrert nærmere 300 driftsforstyrrelser i overføringsnettet i området mellom Bergen og Rana [18]. Til sammen ble om lag 300 000 nettkunder og 53 nettselskaper berørt av avbrudd, og det gikk 5 døgn før alle hadde fått strømmen tilbake. Totalt forekom skader for nærmere 1 mrd NOK. Utkoblet last var i gjennomsnitt 330 MW, og resulterende ILE beløp seg til om lag 15 GWh [3].

## **Ekstremvær**

Som disse eksemplene viser virker klima og vær inn på sårbarheten i kraftforsyningen på flere måter. For det første bidrar disse omgivelsene til å redusere styrken i nettet i forkant av ekstreme hendelser. Værpåkjenninger er i mange tilfeller også direkte årsak til forsyningssvikt. For det tredje kan klima og følger av dette vanskeliggjøre gjenoppsettelse av forsyningen. Til sist kan disse forholdene virke inn på konsekvenssiden ved å gjøre følgene av avbrudd mer alvorlige.

I tillegg til dette oppstår en dominoeffekt i samfunnet ved at effekter av strømbrydd gir sekundæreffekter som beskrevet i kapittel 2.2 Samfunn og sårbarhet.

En kan ikke kontrollere været eller gardere seg mot alle eventualiteter. Dette gjør at en kan føle seg spesielt sårbar ovenfor slike hendelser. En kan imidlertid dra lærdom av hendelser som oppstår slik at en ved fremtidige tilfeller står bedre rustet. Måten et brudd blir håndtert på har mye å si for hvilke konsekvenser som oppstår og hvordan bruddet oppleves. Ekstreme værhendelser gir gjerne store fysiske ødeleggelser i nettet som det tar tid å reparere. I slike tilfeller vil kundeorienterte tiltak som UPS, nødaggregater og mobile aggregater være sentralt for å redusere sårbarheten.

Ekstreme hendelser som disse eksemplene får ofte stor oppmerksomhet, og er en viktig del av klimarelatert sårbarhet. Det er imidlertid viktig å huske på at dette er hendelser som skjer svært sjeldent, og at mer moderate naturkrefter også virker inn på kraftnettet og forårsaker sårbarhet. I neste delkapittel tar for seg aktuelle klimapåkjenninger av ulik styrke og konsekvens.



### 3.2 Aktuelle klimapåkjenninger

Her presenteres de klimapåkjenninger som må kunne påregnes i det norske kraftnettet. Først kan det imidlertid være på sin plass med en nærmere presisering av hva en i denne sammenheng mener med klima og vær ettersom disse begrepene ofte brukes om hverandre og noe tilfeldig.

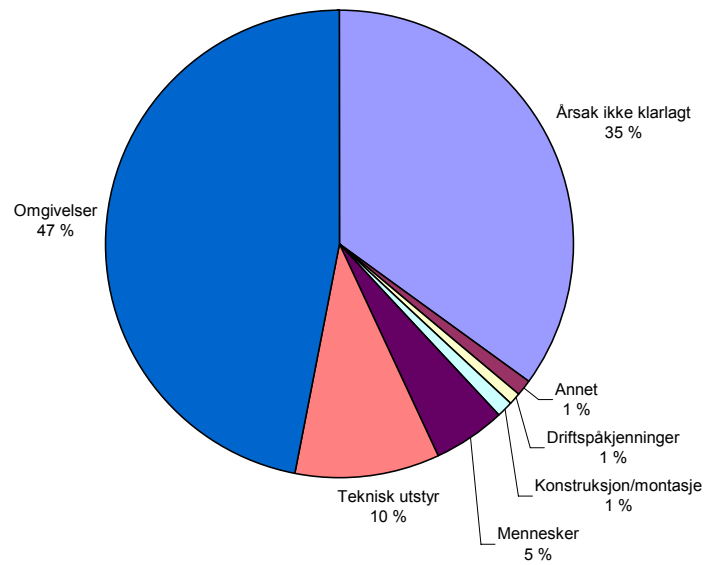
#### Vær og klima

Klima sier noe om den langsiktige tilstanden på jorden og hvilke forhold en må kunne forvente. Det påvirkes av en rekke faktorer som sammensetting i atmosfæren, hav, havis, jordoverflate, snø, is, og vegetasjon. Vær er på sin side uttrykk for den rådende tilstanden i atmosfæren på et tidspunkt eller over en kortere periode [19]. Klima sier altså noe om hvilke typer vær en kan forvente, mens været beskriver tilstanden vi opplever der og da eller over et kortere (selv om det på vinterstid kanskje kan føles langt) tidsrom.

Forhold relatert til klima og vær finnes i avbruddsstatistikkene og registreres i FASIT under ”omgivelser”. Denne kategorien rommer torden, vind, snø/is, salt/forurensning, vegetasjon, fugl/dyr samt andre omgivelser. Normgrunnlag og praksis for denne type registrering ble nærmere beskrevet i kapittel 2.3 under ”Hvordan sårbarhet vurderes og håndteres”.

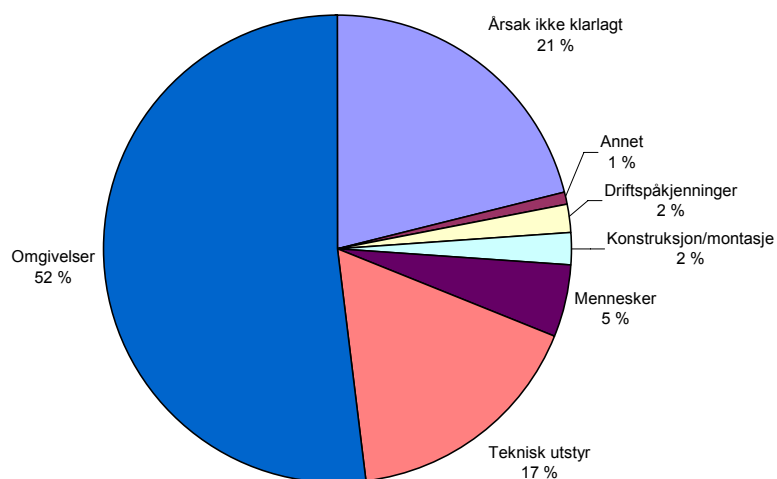
Innledningsvis kan det være interessant å se hvordan antall driftsforstyrrelser og ILE fordeler seg på de ulike FASIT kategoriene. Tallene er hentet fra publikasjonen ”Analyser av feil og avbrudd i kraftnettet 1989-2005” [1] og viser gjennomsnittlig fordeling i løpet av perioden 1999-2005 fordelt på henholdsvis høyspenningsfordeling (1-22 kV) og overføring/hovedfordeling (33-420 kV).

Utløsende årsak 1999-2005. Antall driftsforstyrrelser 1-22 kV



Figur 7 Antall driftsforstyrrelser i 1-22 kV nettet fordelt på utløsende årsak. Prosentfordelingen viser gjennomsnittet for perioden 1999-2005 [1]

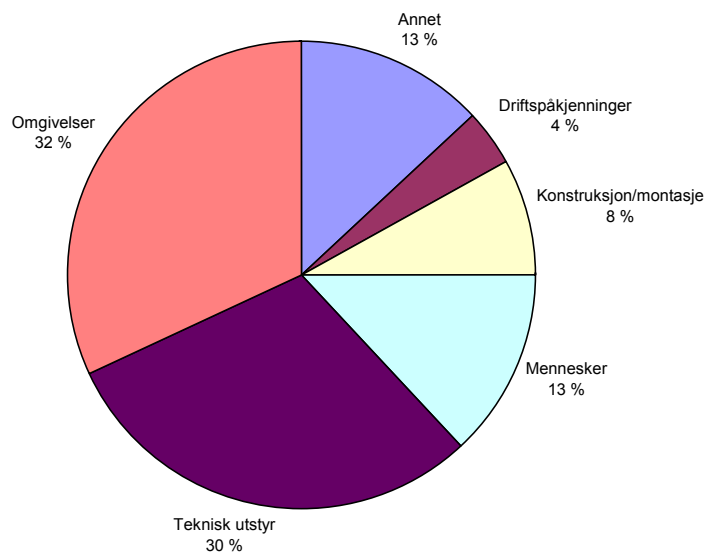
Utløsende årsak 1999-2005. ILE pga driftsforstyrrelser 1-22 kV



**Figur 8 Ikke-levert energi i 1-22 kV nettet fordelt på utløsende årsak. Prosentfordelingen viser gjennomsnittet for perioden 1999-2005 [1]**

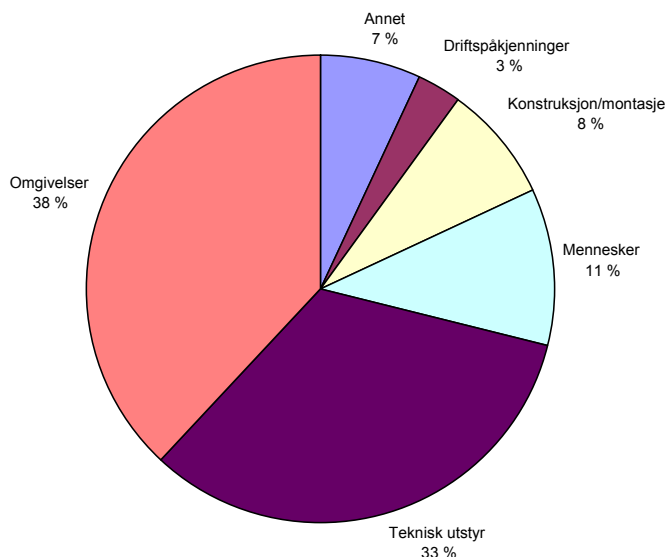
Av figurene 7 og 8 ser en at omgivelser forårsaker 47% av alle driftsforstyrrelser og 52% av alle ILE som følge av driftsforstyrrelsene i 1-22 kV nettet. I tillegg til å være klart dominerende på årsakssiden viser dette at hendelser forårsaket av omgivelser generelt gir lengre avbruddstider en gjennomsnittet for alle utløsende årsaker. For øvrig bør det nevnes at en relativ stor andel (35% for antall og 21% for ILE) av hendelsene ikke har en klarlagt årsak.

Utløsende årsak 1999-2005. Antall driftsforstyrrelser 33-420 kV



Figur 9 Antall driftsforstyrrelser i 33-420 kV nettet fordelt på utløsende årsak. Prosentfordelingen viser gjennomsnittet for perioden 1999-2005 [1]

Utløsende årsak 1999-2005. ILE pga driftsforstyrrelser 33-420 kV



**Figur 10 Ikke-levert energi for 33-420 kV nettet fordelt på utløsende årsak. Prosentfordelingen viser gjennomsnittet for perioden 1999-2005 [1]**

Av figurene 9 og 10 ser en at omgivelser forårsaker 32% av alle driftsforstyrrelser og 38% av alle ILE som følge av driftsforstyrrelsene i 33-420 kV nettet. Fortsatt gir hendelser forårsaket av omgivelser generelt gir lengre avbruddstider en gjennomsnittet for alle utløsende årsaker, men dominansen er noe redusert. På disse nivåene står teknisk utstyr for en betydelig andel av driftsforstyrrelsene (30% av antall og 33% av ILE).

Disse fire figurene viser at vær står sentral i forhold til driftsforstyrrelser og ILE i kraftnettet, og at de dermed også er viktige i et sårbarhetsperspektiv. Under følger en kort beskrivelse av hvordan årsaksforhold fordeler seg innad i ”omgivelser” på kategoriene torden, vind, snø/is, salt/forurensning, vegetasjon, dyr/fugl og andre omgivelser.

I perioden 1989-2005 har ”omgivelser” vært utløsende årsak ved 45 – 65 %<sup>7</sup> av alle varige feil i det høyspente distribusjonsnett (1- 22 kV). Innad i kategorien har det i perioden 1996-2005 vært torden som står for relativt sett flest feil, mens de andre årsakene ligger i underkant av 10 %. Når det gjelder ILE ser det imidlertid ut til at vegetasjon er dominerende. Dette gjenspeiler at selv om lyn oftest forårsaker avbrudd, vil avbruddstidene være relativt sett lengre for andre avbruddsårsaker og da spesielt vegetasjon. Andre viktige bidragsyttere til ILE i distribusjonsnett er vind, torden og snø/is. ILE ved ikke varslede avbrudd i distribusjonsnett utgjorde gjennomsnittlig 52 % av total ILE i perioden 2000-2005 [1].

Når det gjelder høyere spenningsnivåer (33-420 kV) har ”omgivelser” i perioden 1989-2005 vært utløsende årsak ved 25 – 45 % av alle driftsforstyrrelser – altså en noe lavere andel enn for lavere nettnivå. Den generelle trenden for kategorien er en svak nedgang i antall avbrudd. Når det gjelder ILE er variasjonene fra år til år større enn for lavere spenningsnivåer da enkelthendelser kan gi store utslag. Generelt har det ligget rundt 1500 - 4000 MWh i perioden 1989-2005. I 1992 og 1993 lå ILE imidlertid helt opp mot 10 000 MWh, og i 1997 opp mot 6 000 MWh. Når det gjelder fordeling innad i kategorien står torden for 35-65 % av antall hendelser. For ILE er variasjonene også her større, men vegetasjon er dominerende, og kom opp mot 70 % i 2002/2003 [1].

Det er viktig å være oppmerksom på at slike statistikker i stor grad kan farges av enkelte ekstreme hendelser. Dette vises for eksempel i den høye prosentvise andelen ILE forårsaket av vegetasjon i 2003. Dette er et resultat av en storm som forårsaket mye trefall på Østlandet 6. desember 2003. Det kan i visse tilfeller være aktuelt å behandle disse hendelsene separat.

Under følger en nærmere presentasjon av aktuelle klimapåkjenninger med utgangspunkt i klassifiseringen brukt i FAST.

---

<sup>7</sup> Oppskalerte tall

## **Torden**

Lynnedslag påvirker i hovedsak kraftlinjene på tre ulike måter. Nedsalg i toppline, direkte i leder eller i omgivelsene. Luftlinjer i sentral- og regionalnettene har som regel toppliner som skal redusere sannsynligheten for nedslag direkte i ledere. Nedslag til disse jordlinene kan likevel påvirke kraftforsyningen gjennom overslag til luftliner ved ugunstige jordingsforhold. Tross toppliner hender det dessuten at lynet slår direkte ned i ledere. På lavere spenningsnivå mangler ofte toppliner, og her vil lynnedslag slå direkte ned i ledere. I distribusjonsnettet kan en dessuten få induerte overspenninger som følge av lynnedslag i nærheten av kraftlinjene. Dette nettet er ofte dimensjonert slik at en i enkelte tilfeller kan få svært høye overspenninger i forhold til isolasjonsnivået [20].

Den vanligste svikthendelse i forbindelse med lynnedslag er overslag over ledningsisolasjonen uten varige skader. I slike tilfeller kan hurtig gjeninnkobling hindre unødvendige avbrudd. Ved flere utladninger i samme kanal kan en imidlertid få gjentatte utkoblinger som gjør at linjen blir liggende ute inntil den er inspisert og kan kobles inn manuelt [20]. Lyn kan også redusere en leders mekaniske styrke ved pitting av overflaten eller ved å smelte eller slite av ytre tråder [21].

Hyppigheten av torden varierer geografisk, mellom årstidene og fra år til år. Hvordan en luftlinje går i terrenget vil også ha betydning for hvor ofte den treffes av lynnedslag. Ledninger i høyfjellsterreng kan være spesielt utsatte fordi relativ nærhet av den høye elektriske feltstyrken kan initiere utladninger [20].

## **Vind**

Vind forårsaker svingninger i kraftlinjene, og påvirker på tre ulike måter; aeoliske vibrasjoner, sub-leder svingninger og galoppering [21].

Aeoliske vibrasjoner er høyfrekvente vibrasjoner i området 10-40 Hz med amplituder opp mot linjens diameter. Denne type vibrasjoner kan, avhengig av lokale vindforhold og kraftlinjenes egenskaper, forårsake utmattelse og skade i ledertrådene. Påkjenningen er

størst der vinden treffer vinkelrett på linjene i åpent, flatt terreng. Skade oppstår oftest i punkter der lederne er festet og oftest ved en klemme. Slike vibrasjoner gir ofte fra seg lyd [21].

Sub-leder svingninger oppstår på linjer med avstandsholdere og har frekvenser rundt 1 Hz med amplituder opp mot avstandsholderne slik at en i enkelte tilfeller har fått sammenslag. Skader oppstår også her oftest der lederne er festet – i dette tilfellet ved avstandsholdere [21].

I verste fall kan aeolisk vibrasjon og sub-leder svinging føre til at alle aluminiumstrådene i lederen ryker og at strømmen må gå gjennom stålkjernen. Dette fører til at stålet smelter og lederen blir ødelagt [21].

Gallopering kjennetegnes av lave frekvenser (0,1 – 1 Hz) og store amplituder i området 1 – 10 meter. Som regel trengs andre meteorologiske forhold som for eksempel is med en spesiell aerodynamisk profil for at denne type svingninger skal oppstå. Gallopering kan forårsake skader på linjer der overslag har smeltet det ytre aluminiumslaget. Det kan også forårsake stor slitasje på fester og løse avstandsholdere samt ødeleggelse på mastekonstruksjon og isolatorer [21].

Generelle tegn på vindskader kan være manglende eller deformerte vibrasjonsdempere, manglende skruer i hengeklemmer eller konstruksjoner, forskyvde corona ringer eller isolator strenger, ødelagte indre eller ytre ledertråder, manglende eller forskyvde markører for flytrafikk, løse eller ødelagte konstruksjonsdeler i mastetårn og slitasje på ledningsoppheg. Sterk vind er den vanligste årsaken til løse bolter og brudd i stålkonstruksjoner [21].

I tillegg har en selvfølgelig ekstreme situasjoner der vindstyrke alene eller sammen med andre påkjenninger som snø, is eller trær ødelegger luftliner, master eller støttekonstruksjoner. Spesielt omfattende kan dette bli i skogsområder der nedfall av trær



senker og vanskeliggjør reparasjonsarbeidet. Et godt eksempel på dette er orkanen Gudrun som rammet Sør-Sverige i januar 2005.

### **Snø/is**

Snø og is som legger seg på linjene gir en ekstra belastning som alene eller sammen med andre påkjenninger som for eksempel vind kan overstige den mekaniske styrken i en slik grad at linjer sliter og konstruksjonsdeler bryter sammen. Dette kan variere fra enkeltlinjer og enkeltkonstruksjoner, til store ødeleggelser over store områder i likhet med det en så under isstormen i Canada i 1998. I tillegg kan en få sammenslag og kortslutning ved at snø faller fra linjer og skaper svingninger slik at liner kommer for nær hverandre eller stolper [22].

Det finnes flere typer is, og den dannes under ulike forhold. Store variasjoner i type og ikke minst tetthet gjør sammen med mangelfulle målinger og avhengighet av lokale forhold at det er vanskelig å bestemme hvilke kriterier som skal legges til grunn for mekanisk dimensjonering. Den sjeldne frekvensen det opptrer med gjør at en trenger lange tidsserier og det er i dag et mangelfullt datagrunnlag når det gjelder ising på kraftlinjer [20].

I tillegg kan forurenset snø og is være med å redusere isolasjonsholdfastheten på samme måte som belegg av salt og/eller forurensning beskrevet i neste avsnitt.

### **Salt/forurensning**

Saltbelegg kan være et problem i utsatte kystområder på grunn av sjøsprøyt. Hvor langt inn i landet dette er problematisk avhenger av topografiske forhold, men det er rapportert om driftsproblemer på grunn av salt flere mil inn i landet og høyt til fjells. Det er spesielt fuktig saltbelegg (skodde, sludd, lett yr o.) som reduserer isolasjonsholdfastheten [20].

Isolasjonsholdfastheten kan også reduseres i områder med mye industriforurensning. Denne industriforurensningen kan transporteres over store avstander og på tvers av landegrensener. Fuktighet gjør også i dette tilfellet eventuelle problemer større [20].

### Vegetasjon

Vegetasjon er ikke direkte værrelatert, og blir i første rekke et selvstendig problem dersom en har manglende rutiner for vedlikehold. Sikkert drevne nett i godt vedlikeholdte traseer skal i utgangspunktet ha minimale avbrudd som følge av vegetasjon.

Vegetasjon kan likevel bli et stort problem i samspill med vær – først og fremst sterk vind. Trær som blåser bort i eller velter over krafttraseer kan som nevnt i avsnittet om vind forårsake lange avbruddstider og betydelig reparasjonsarbeid.

### Andre omgivelser

Den viktigste værrelaterte hendelsen vil nok i denne sammenheng være regn. Kraftig nedbør kan oversvømme kraftstasjoner og transformatorstasjoner. Det kan også utløse eller øke faren for jord- eller leirras som rammer kraftlinjene (mastene) eller erosjon rundt fundamenter [20]. Dette vil imidlertid være relativt sjeldne hendelser.

Denne korte presentasjonen viser hvordan værphenomener, ofte i et samspill med lokale forhold, påvirker kraftnettet og gjør det sårbart.

### **3.3 Utfallsrom. Aktuelle hendelser.**

Med utgangspunkt i litteraturstudie og erfaringer gjort ved Statnett sin driftssentral på Sunndalsøra har en utarbeidet en liste over relevante værrelaterte hendelser i kraftnettet. Denne kan brukes som et utgangspunkt for en vurdering av hvilke feil som kan forventes i et nett.

I forkant av tabellen er det på sin plass å påpeke at selv om denne oppgaven begrenser seg til værrelaterte hendelser vil en ha mange feilsituasjoner i kraftnettet som ikke skyldes dette. Det er dermed ikke en utfyllende liste i forhold til en fullstendige ROS analyse.

Utfallsrom for klima- og værrelaterte hendelser i kraftnettet

Utløsende og medvirkende årsak (vær)	Bakenforliggende årsak (teknisk tilstand)	Feilbeskrivelse	Resultat (feil situasjon)
Direkte lynnedslag til luftledning <sup>8</sup>	Vanskelige jordingsforhold	Jordfeil	Bryterfall/utkobling med eller uten gjeninnkobling
--		Kortslutning	Bryterfall/utkobling med eller uten gjeninnkobling
--		Jordfeil og kortslutning	Bryterfall/utkobling med eller uten gjeninnkobling
--			Overspenning som resulterer i stor 50 Hz følgestrøm som skader elektronikk og datautstyr og brannstiftelse (først og fremst i distribusjonsnett)
--	Ikke-optimal dimensjonering	Ødelagt bryter	Forsyningsbrudd
--	Ikke-optimalt vern, havarete/ikke-fungerende overspenningsavledere	Ødelagt transformator	Forsyningsbrudd
--		Ødelagt strøm/spennings-transformator	
Sjøsprøyt / industriforurensning / Forurenset snø/isbelegg		Overslag til jord fra linje/isolator	Utkobling med eller uten gjeninnkobling
--		(Dobbel) jordslutning	Bryterfall/utkobling
Vind	Manglende avstandsholdere	Fasesammensalg	Bryterfall/utkobling med eller uten gjeninnkobling
--		Brudd i en eller flere master	Fysisk forsyningsbrudd
Vind og trefall		Linje ryker	Fysisk forsyningsbrudd

<sup>8</sup> Kan også oppnås i sentralnettet ved overslag fra jordline ved vanskelige jordingsforhold eller på luftledninger distribusjonsnettet som følge av indusert overspenning fra lynnedslag i nærheten.

Vind og trefall	Manglende vedlikehold av traseer	Kortslutning	Utkobling med eller uten gjeninnkobling
Vind		Avslitte aluminiumstråder	Fysisk forsyningsbrudd
--		Utmattelse eller skade i ledertråder	Nedsatt mekanisk styrke
--		Slitasje på fester/ledningsoppheng og avstandsholdere	Nedsatt mekanisk styrke
--		Manglende eller løse bolter og skruer	Nedsatt mekanisk styrke
--		Ødelagte konstruksjonsdeler	Nedsatt mekanisk styrke
Is/snø		Konstruksjoner kollapser	Fysisk forsyningsbrudd
--		Linjer ryker	Fysisk forsyningsbrudd
		Kortslutning	Bryterfall/utkobling med eller uten gjeninnkobling
Regn		Oversvømmelser	
--		Jord- eller leirras	Fysisk forsyningsbrudd

**Tabell 4** Liste over hvilke hendelser som kan oppstå på grunn av ulike typer vær. Tabell med Statnett sine kommentarer finnes i vedlegg 2.

Hendelser nevnt i litteraturstudier, men som en ikke hadde hørt om i Statnett:

**Utfallsrom for klima- og værrelaterte hendelser i kraftnettet, forts.**

Utløsende og medvirkende årsak (vær)	Bakenforliggende årsak (teknisk tilstand)	Feilbeskrivelse	Resultat (feil situasjon)
Lyn		Brudd i ytre ledertråder	Redusert mekanisk styrke
--		Nedsatt funksjonalitet i vibrasjonsdempere	Nedsatt mekanisk styrke
--		Forskyvning i corona ringer og islator strenger	
Vind		Linjer ryker som en direkte følge av vindstyrke	Fysisk forsyningsbrudd

**Tabell 5** Tillegg til tabell 4. Disse hendelsene kunne imidlertid ikke Statnett bekrefte som aktuelle i kraftnettet.

Det bør nevnes at en rekke bakenforliggende forhold vil kunne påvirke utfallet av en situasjon. Mangel på inspeksjon og vedlikehold samt feilaktig dimensjonering er generelle årsaker som kan virke inn i de fleste tilfeller.

### **Tiltak**

Tabell 4 gir et godt utgangspunkt for å vurdere og iverksette nettorienterte tiltak for å redusere sårbarheten. Eksemplene fra kapittel 3.1 viste imidlertid at nettorienterte tiltak ikke alltid kan sørge for sikker forsyning når en står ovenfor ekstreme vær-situasjoner. Ulike kundeorienterte tiltak ble indirekte håndtert i kapittel 2.2 Samfunn og sårbarhet. Her nevnes behov for forberedelse, beredskapsplaner, UPS og reserveaggregater (mobile aggregater og nødaggregater) for å øke funksjonsdyktigheten i samfunnet ved lengre avbrudd. Lengre avbrudd forårsakes som regel av fysiske ødeleggelser som karakteriserer nettopp klimarelaterte utfall. En god strategi for å redusere klimarelatert sårbarhet vil dermed med all sannsynlighet måtte inneholde ulike kundeorienterte tiltak.

## **3.4 Klimaendringer**

Kapittelet om klima og sårbarhet har så langt hovedsaklig vært empirisk basert. En har tatt utgangspunkt i vær-situasjoner en har sett eller som en med utgangspunkt i klima må kunne forvente å oppleve i dag. Dette er ikke nødvendigvis representativt for de utfordringer en står ovenfor om en ser litt lengre frem i tid. Muligheten for at menneskers aktivitet er med på å endre klimaet langt raskere enn naturlig utvikling skulle tilsi har lenge vært debattert. At slik menneskeskapt klimaendring ikke bare er mulig, men finner sted allerede i dag sannsynliggjøres i stadig større grad gjennom vitenskaplige arbeider.

Tidligere i år kom FN sitt klimapanel IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) med sin fjerde tilstandsrapport om klimaendringer ”Climate Change 2007” [23]. Rapporten slår fast at det er en sannsynlighet på mer enn 99% for at dagens CO<sub>2</sub> nivå i atmosfæren og den globale oppvarmingen overstiger de naturlige svingningene en har hatt de siste 650 000 årene. Det heter også at den økte konsentrasjonen av klimagasser

har minst fem ganger så mye betydning for klimaendringer enn økningen i naturlig solstråling som er registrert de siste tiårene [24].

Når det gjelder generelle klimaendringer i dag peker IPCC rapporten blant annet på at 11 av de 12 siste årene har vært blant de 12 varmeste siden en begynte med regelmessige målinger rundt 1850. Økt smelting av snø og is samt at vann utvider seg når temperaturene øker får havnivået til å stige. Anslagsvis vil det stige med 14-43 centimeter innen 2100.

De siste hundre årene har en også opplevd endringer i nedbør. Store deler av det amerikanske kontinentet, Nord-Europa, Nord- og Sentral-Asia har hatt en betydelig nedbørsøkning, mens en i Afrika og det sørlige Asia har opplevd mer tørke. Disse trekkene antas i følge IPCC å forsterkes. Det anslås også en økning i ekstremvær. Spesielt tropiske sykkloner vil tilta både i antall og styrke [24].

RegClim er et samarbeidsprosjekt mellom Meteorologisk Institutt og Universitetene i Oslo og Bergen som utvikler klimascenarier for Norge og områdene rundt. Resultatene fra dette arbeidet indikerer at en i Norge generelt vil få høyere temperaturer og mer nedbør. Avhengig av hvor i landet en befinner seg vil gjennomsnittstemperaturen stige med 2.5 – 3.5 °C. Tilsvarende vil en få en økning i nedbør mellom 5 – 20% [25]. Nedbørens intensitet kan også komme til å øke [26]. Størst er økningen om høsten og langs kysten og i nord. Sommeren på Østlandet og Sørlandet kan bli tørrere enn før. Når det gjelder vind er endringene beregnet til å være moderate. Maksimal vindstyrke endres lite, men det kan bli flere døgn med sterk vind. Langs kysten vil vindstyrker som kun forventes oversteget en gang i året opptre oftere. Størst økning forventes utenfor kysten av Troms og Finnmark der slike vinder vil kunne opptre mer en dobbelt så ofte [26].

Mange usikkerhetsmomenter gjør det vanskelig å anslå nøyaktig hva dette har å si for kraftforsyningen i Norge. Tidsperspektivet det er snakk om gjør sammen med kraftkomponenters levetid at det viktigste vil være å ta høyde for disse endringene ved dimensjonering av nye linjer og oppgraderinger av gamle linjer. Mer nedbør kan i den

grad det gir mer snø og is øke maksimalbelastning slik at dette må tas hensyn til. Videre kan være fornuftig å ta høyde for økt mekanisk slitasje ettersom islaster og kanskje også sterk vind kan forekomme hyppigere i en del områder.

Svein Fikke er meteorologisk konsulent for kraftledninger og har foreslått noen mulige scenarier for Norge:

#### Endrede forutsetninger grunnet klimaendringer

Sted	Beskrivelse
Langs kysten til og med Nordland/Troms	Sjeldnere våtsnø
Innlandet (Agder, Telemark, Østlandet)	Oftere og mer våtsnø, men muligens skyis kun over om lag 1000 m
Langfjella	Oftere og mer våtsnø. Muligheter for mindre skyis under ca 900 m og mer over ca 900 m
Nordland, Troms og Finnmark	Mer våtsnø i innlandet og fjellet. Kanskje mindre skyis under 600-700 m

**Tabell 6** Mulige endringer værforhold kan bli relevant i et forsyningsperspektiv [27]

Det kan bety at påkjenningene i kraftnettet øker noe enkelte steder grunnet mer våtsnø i innlandet og mer skyis i høyereliggende områder. Det eksakte resultatet er imidlertid vanskelig å avgjøre ettersom det som tidligere nevnt ikke bare er usikkerhet knyttet til fremtidige islaster, men også dagens islastfordeling. Spesielt er det stor usikkerhet knyttet til et mulig større variasjonsområde (standardavvik) i ekstremhendelser i fremtiden [28]

Det kan ikke sies å være noen entydige tegn på at sårbarheten vil øke betydelig som følge av klimaendringer – selv om det heller ikke kan avskrives. Dette er i første rekke knyttet til usikkerhet i forhold til hvilke endringer som faktisk finner sted, til maksimal islast og endringer i denne.

### 3.5 Oppsummering

I dette kapitlet ble sårbarhet i kraftnettet relatert til klima uttrykt ved vær. Vær ble definert som et ”øyeblikksbilde” av klima.

Gjennom eksempler fra virkeligheten så en hvor sårbart kraftnettet og samfunnet kan være ovenfor ekstreme værhendelser, og at en ved avbrudd får en dominoeffekt på konsekvenssiden. En så også hvordan klima kan påvirke en hendelse på ulike stadier. Det kan være bakenforliggende, utløsende, forlengende og forverrende.

Værrelaterte avbrudd registeres i FASIT under ”omgivelser” som deles i kategoriene torden, vind, snø/is, salt/forurensning, vegetasjon, dyr/fugl og andre omgivelser.

Relevante kategorier ble nærmere presentert i kapitlet, og en etablerte et utfallsrom med aktuelle hendelser. Dette er en liste over hvilke problemer de ulike værtypene kan skape i kraftnettet, og hvilke konsekvenser det gir. Dette er et nyttig utgangspunkt for evaluering av et reelt nett.

Klimaendringer kan føre til at denne listen må korrigeres, og et er ting som tyder på at det norske kraftnettet i fremtiden vil utsettes for mer slitasje og også kanskje noe sterkere påkjenninger. Dette kan få konsekvenser for dimensjoneringskriterier, men det er store usikkerhetsmomenter knyttet til disse potensielle endringene.

Etter denne grundige presentasjonen av klimapåkjenninger kan en nå presentere en metode for klimarelatert sårbarhetsanalyse.



## 4 Metode

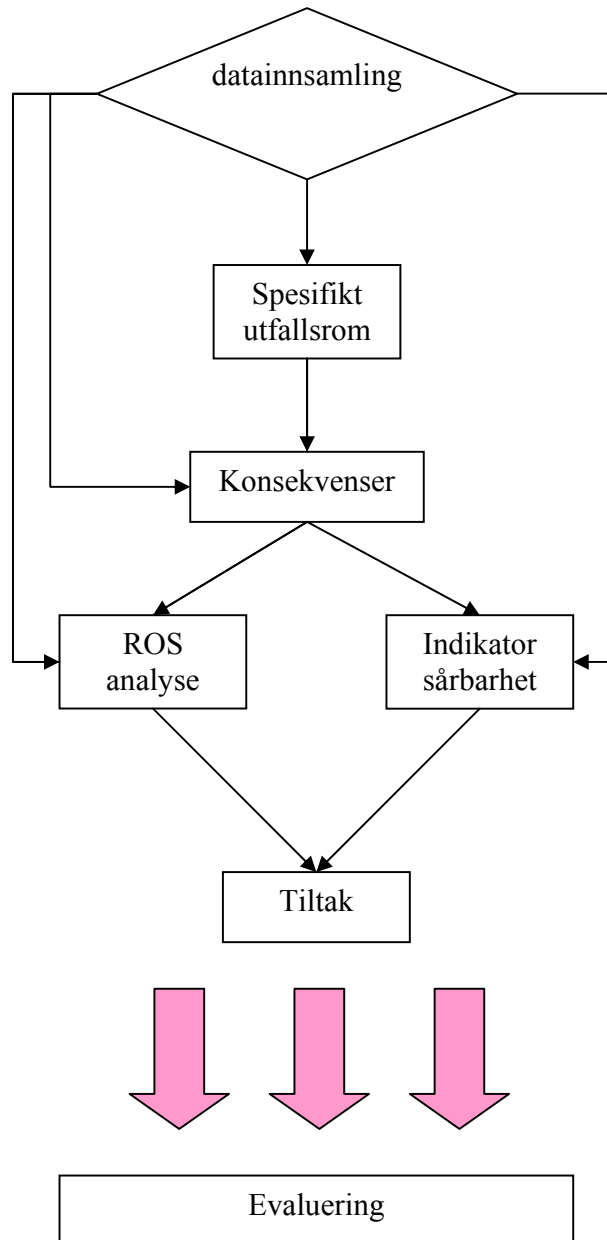
I dette kapitlet beskrives metoden som presenteres og brukes i denne oppgaven. Den tar utgangspunkt i definisjonen på sårbarhet i kraftnettet gitt i denne oppgaven, evaluering av indikatorer og karakteristiske trekk ved klimapåkjenninger. Resultatet av dette blir en kombinasjon av tradisjonell ROS-analyse som presentert i vedlegg til norm og sårbarhetsindikatoren presentert i denne oppgaven. Denne metoden fremhever som argumentasjonen i kapittel 2.4 viser reel sårbarhet, samtidig som hensynet til samfunnsøkonomisk akseptabelhet overholdes i forhold til eventuelle tiltak.

Fremgangsmåten kan deles i 7 deler:

1. Datainnsamling
2. Etablere spesifikt utfallsrom
3. Beregne/vurdere konsekvenser
4. Standard ROS analyse
5. Sårbarhetsindikator
6. Tiltak
7. Evaluering

Gangen i analysen er vist i flytskjemaet på neste side. Deretter kommer en nærmere beskrivelse av de ulike punktene. Hensikten med metoden er å foreta en sårbarhetsvurdering av klimapåkjenningene i et gitt område. Metoden kan enkelt utvides til å gjelde flere hendelser eller andre typer påkjenninger ved å utvide eller endre datagrunnlag og spesifikt utfallsrom. Metoden er illustrert med en case i kapittel 7.

Metode for sårbarhetsanalyse av klima- og værpåkjenninger

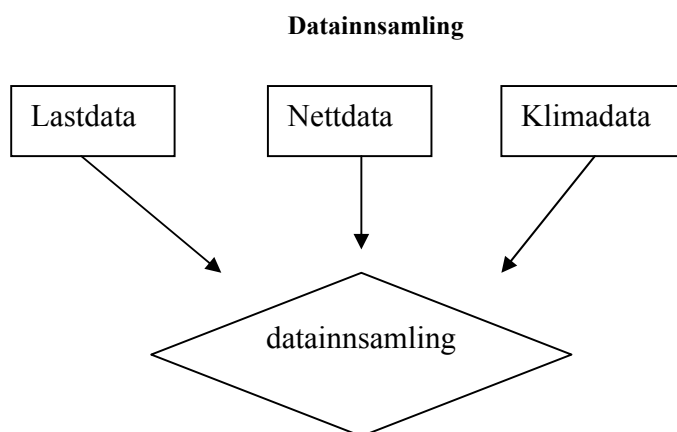


Figur 11 Flytskjema for metoden foreslått i denne oppgaven for sårbarhetsanalyser

## 4.1 Datainnsamling

Minimum tre typer data trengs for å vurdere værrelatert sårbarhet i et kraftnett:

- Lastdata
- Nettdata
- Klimadata



Figur 12 Utgangspunkt for datainnsamling i en klimarelatert sårbarhetsanalyse

### Lastdata

Avgjørende her er utkoblet effekt for beregning av ILE for å finne KILE og karakteristisk effekt for å finne sårbarhetsindikatoren. I casen i neste kapittel er karakteristisk effekt gitt med maksimalt lastuttak. Videre må en vite hvordan last fordeler seg på de ulike kundegruppene ved de ulike forsyningssituasjonene for å finne total KILE for ROS-analysen og KILE pr time pr kunde for sårbarhetsindikatoren.

**Lastdata**

<b>Data</b>	<b>Bruk</b>
Utkoblet effekt	Beregning av ILE
Karakteristisk effekt (maksimalt lastuttak i dette tilfellet)	Beregning av sårbarhetsindikator; utetid for maksimal effekt
Lastfordeling	Direkte konsekvens for kunder ved avbrudd

Tabell 7 Tabell over lastdata som er nødvendig for å utføre sårbarhetsanalysen. Bakerste kolonne viser hvor i analysen de behøves

## Klimadata

Klimadata forteller hvilke værtyper en kan forvente, og er naturlig nok i kombinasjon med kraftnettets omgivelser utgangspunktet for å plukke ut værrelaterte hendelser i nettet. I tillegg må en ha kunnskap om hvordan vær og klima påvirker kraftnettet.

**Klimadata**

<b>Data</b>	<b>Bruk</b>
Vær som påvirker nettet	Feiltyper
Karakteristisk lokalt vær	Feil

**Tabell 8** Tabell over klimadata som er nødvendig for å utføre sårbarhetsanalysen. Bakerste kolonne viser hvor i analysen de behøves

## Nettdata

For å vurdere hvilke hendelser som kan oppstå og hva de forventede konsekvensene vil være, må en i tillegg til å vite hvilket landskap linjene går gjennom ha kunnskap om linjetype og tilstand. I caset uttrykkes ikke dette eksplisitt, men antas å ligge til grunn for etablering av spesifikt utfallsrom.

Videre må en for å finne direkte konsekvenser for kunder (f.eks representert ved KILE) vurdere hvilke forsyningssituasjoner som (med all sannsynlighet) vil oppstå på bakgrunn av aktuelle uønskede hendelser. Dette må baseres på nettopologi, overføringskapasitet og reserver. I caset opereres det med tre situasjoner; opprettholdelse av full forsyning, delvis forsyning (50%) eller totalt avbrudd.

Videre må en se på forventede utetider som vil være en funksjon av feildeteksjon, tid til feilsted og reparasjonstid. Dette er i casen løst ved at hver uønsket hendelse er gitt en skjønsmessig total utetid med utgangspunkt i feilsted og feiltype.

### Nettdata

Data	Bruk
Netttype	Spesifikt utfallsrom
Tilstand	Spesifikt utfallsrom
Topologi	Forsyningssituasjoner
Omgivelser	Spesifikt utfallsrom
Utetider	KILE, avbruddskonsekvenser

**Tabell 9** Tabell over nettdata som er nødvendig for å utføre sårbarhetsanalysen. Bakerste kolonne viser hvor i analysen de behøves

En fullstendig ROS analyse vil i utgangspunktet måtte ta for seg kombinasjonen sannsynlighet – konsekvens av alle aktuelle reelle hendelser. For et nettsystem blir dette et tilnærmet uendelig oppgave. En hendelse vil med ulik sannsynlighet kunne forekomme nesten hvor som helst i nettet med konsekvenser som varierer i forhold til feilsted. Et tre som velter over en linje vil gi ulik utetid (og dermed KILE) avhengig av hvor dette skjer. Skjer det utenfor nettselskapets lokaler vil det forhåpentligvis gå relativt raskt å rette feilen. Mer omfattende (både i forhold til tid og ressurser) kan det bli å reparere linjen etter et trefall som skjer i et øde skogsområde med dårlig tilgjengelighet. Ulike feilsteder vil også kunne føre til at ulikt antall kunder mister strømmen, og at konsekvensene varierer ut fra det. Et sted fører kanskje treet til at et helt byggefelt eller et lite sentrum mister strøm, mens det i andre tilfeller kanskje bare er en enkelt kunde som blir rammet.

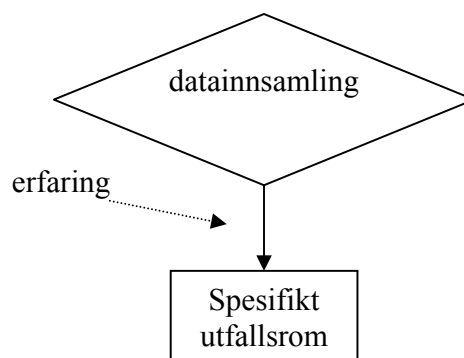
En fullstendig ROS analyse i utgangspunktet ta hensyn til alle disse forhold. Dette blir raskt en uoverkommelig oppgave, og en blir nødt til å gjøre forenklinger. I denne casen er dette løst ved å dele nettområder inn i ulike soner der en antar like forhold. Innad i hvert område er dermed sannsynligheter og konsekvenser (og dermed risiko og sårbarhet) konstante. Dett gir et håndterbart antall diskrete hendelser. Det er viktig at disse sonene blir delt inn på en hensiktsmessig måte, og at de innad er mest mulig homogene. I casen tar sonene utgangspunkt i nettnivå og omgivelser (som antas å være avgjørende for feiltype og avbruddstid). Data for hvert segment er basert på gjennomsnittsbetraktninger. For eksempel inngår gjennomsnittlig tid til feilsted i total avbruddstid.

Hvor mange og hvor store disse områdene bør være avhenger selvfølgelig av områdets karakteristikk, men også av ønsket detaljnivået i analysen. Det optimale vil være å finne en optimalisering mellom nødvendig arbeidsinnsats og nøyaktighet i analysen. Dette vil være der verdien av arbeidet tilsvarer verdien av det resultatet som kommer ut. Det fine her er at når en ROS analyse først er foretatt for et gitt område, vil det være relativt sett mindre ressurskrevende å holde den oppdatert, og å utvide den.

Dersom ROS analysen brukes som et verktøy for å finne hvilke hendelser som er mest kritiske, kan det være aktuelt å se bort fra enkelte deler av nettet. En kan for eksempel velge å fokusere på soner der feil gir svært høye konsekvenser eller soner med svært høy feilsannsynlighet. Hvordan ressurser prioriteres i forhold til disse områdene, vil være et vurderingsspørsmål. Et ofte debattert spørsmål er hvor store ressurser som skal brukes på å hindre hendelser som er svært usannsynlige, men som vil gi ekstreme konsekvenser dersom de inntreffer. En ROS analyse vil nødvendigvis bære preg av en del skjønsmessige vurderinger.

Spesifikt for dette caset har en valgt se bort fra feil i en seksjon (seksjon 6) på grunn av få karakteristiske værrelaterte avbruddstyper, lav feilfrekvens og kort utetid.

## 4.2 Spesifikt utfallsrom

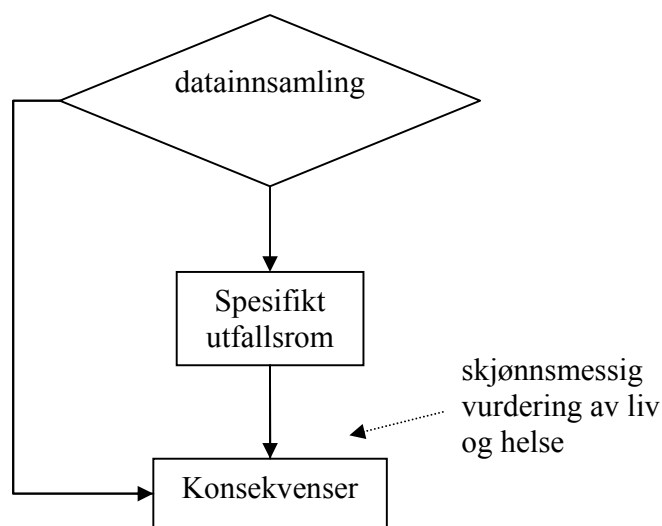


Figur 13 Flytskjema som viser utgangspunktet for å etablere spesifikt utfallsrom

Det generelle utfallsrommet etablert i kapittel 3 brukes sammen med karakteristiske vær-situasjoner i de ulike linjesegmentene (ofte erfaringsbasert) til å etablere spesifikt utfallsrom. Hendelser anordnes en sannsynlighet i henhold til skala foreslått i veiledning til norm. Det antas at dette kan gjøres med utgangspunkt i avbruddsdata og erfaring.

I denne casen blir alle avbruddshendelser for karakteristiske vær-phenomener for en gitt seksjon tatt med i utfallsrommet. I et reelt tilfelle kan en tenke seg at enkelte av disse elimineres på erfaringsgrunnlag.

### 4.3 Konsekvenser



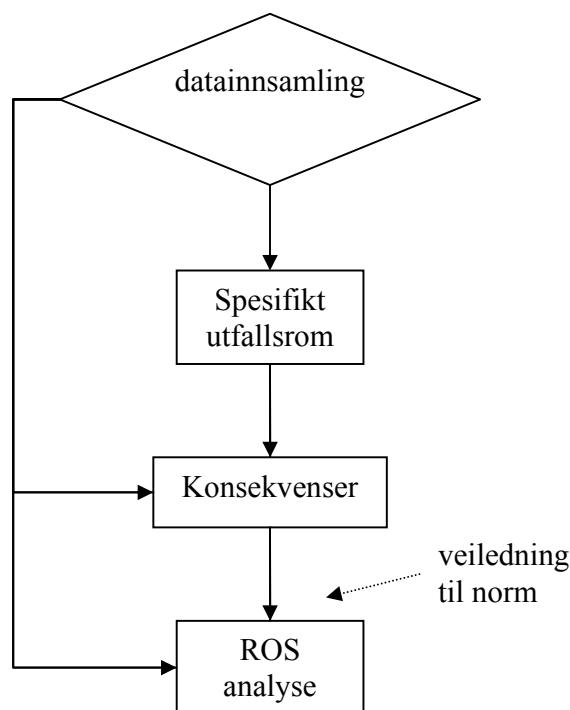
Figur 14 Flytskjema som viser datagrunnlaget for bestemmelse av konsekvenser

Totale økonomiske kostnader for hver hendelse i utfallsrommet beregnes og klassifiseres for bruk i ROS-analysen. Her ser en på KILE, arbeidsinnsats og komponenter som må byttes ut. KILE kostnadene danner også utgangspunkt for sårbarhetsindikatoren i form av KILE pr kunde pr time.

Andre konsekvenser i form av fare for liv og helse behandles i større grad kvalitativt.

I denne casen brukes NVE sine foreslåtte inndelinger når det gjelder konsekvens og sannsynlighet. Det kan i den sammenheng være verdt å bemerke at til tross for at NVE kommer med spesifikke kategorier kan konsekvenser ramme ulike selskaper ulikt. Dette gjelder kanskje spesielt økonomiske konsekvenser. I et reelt tilfelle kan det være greit å ha kriterier knyttet opp mot egen økonomiske situasjon og eget ambisjonsnivå i forhold til de mer kvalitative målene.

#### 4.4 ROS analyse

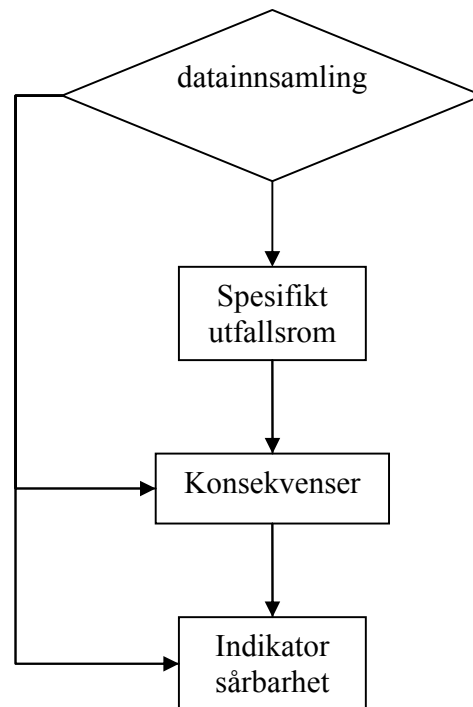


**Figur 15** Flytskjema som viser utgangspunktet for å utføre tradisjonell ROS analyse

ROS analyse utføres med utgangspunkt i fremgangsmåten beskrevet i vedlegg 1. Risiko beregnes for hver uønskede hendelse med utgangspunkt i sannsynlighetene funnet for det spesifikke utfallsrommet og mest alvorlige konsekvens. Med mest alvorlig konsekvens menes total økonomisk konsekvens med mindre fare for liv og helse dikterer en mer alvorlig konsekvenskategori. Resultatet er gitt ved en risiko matrise



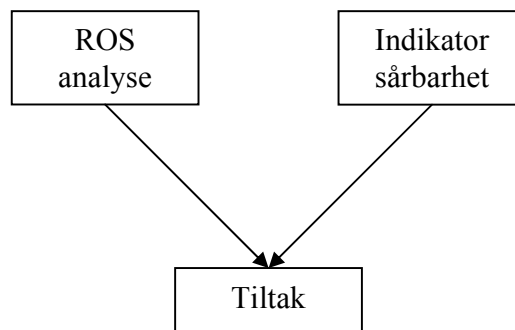
#### 4.5 Sårbarhetsindikator



Figur 16 Flytskjema som viser utgangspunktet for å finne sårbarhetsindikatoren

Her benyttes metoden beskrevet under ”utetid for effekt” i kapittel 2.4. Konsekvens representeres ved KILE pr kunde pr time og beregnes med utgangspunkt i de ulike forsyningssituasjonene. I caset brukes maksimalt lastuttak som karakteristisk effekt.

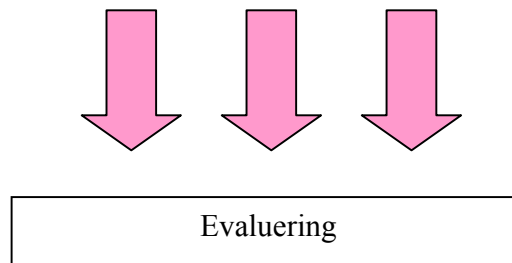
#### 4.6 Tiltak



Figur 17 Tiltak vurderes ut fra et kompromiss mellom ROS analyse og sårbarhetsindikatoren

Her beskrives hvilke tiltak som synes mest aktuelle og som bør vurderes basert på den foregående analysen. Tiltakene vil være basert på en sammenstilling og et kompromiss mellom de ROS-analysen og sårbarhetsindikatoren. Dette som en forsikring om at tiltakene er reelt sårbarhetsreduserende samtidig som det er økonomisk akseptable.

## 4.7 Evaluering



**Figur 18** Evalueringen representerer en helhetlig vurdering av resultat av analysen og hvordan denne ble gjennomført.

Her presenteres et sammendrag av analysens resultat og en vurdering av nytteverdien av en slik analyse. En bør også vurdere kvaliteten av analysen som ble gjennomført - herunder om datagrunnlag var tilstrekkelig og om inndelingen av nettet var egnet for bruken.

## 5 Case

I dette kapitlet konstrueres en case som tar i bruk metoden og strategiene beskrevet tidligere i oppgaven. Utgangspunkt for casen er et tenkt forsyningsområde med gitt forsyning. Et relativt enkelt og oversiktlig oppsett med et lite samfunn og to forsyningslinjer er valgt slik at resultatet av metoden lettere kan vurderes. For dette systemet foretas en utvidet risiko og sårbarhetsanalyse ved maksimal last. Hensikten er å undersøke om et slikt utvidet perspektiv formidler sårbarhet på en hensiktsmessig måte, og om det utvidede perspektivet gir økt forståelse.

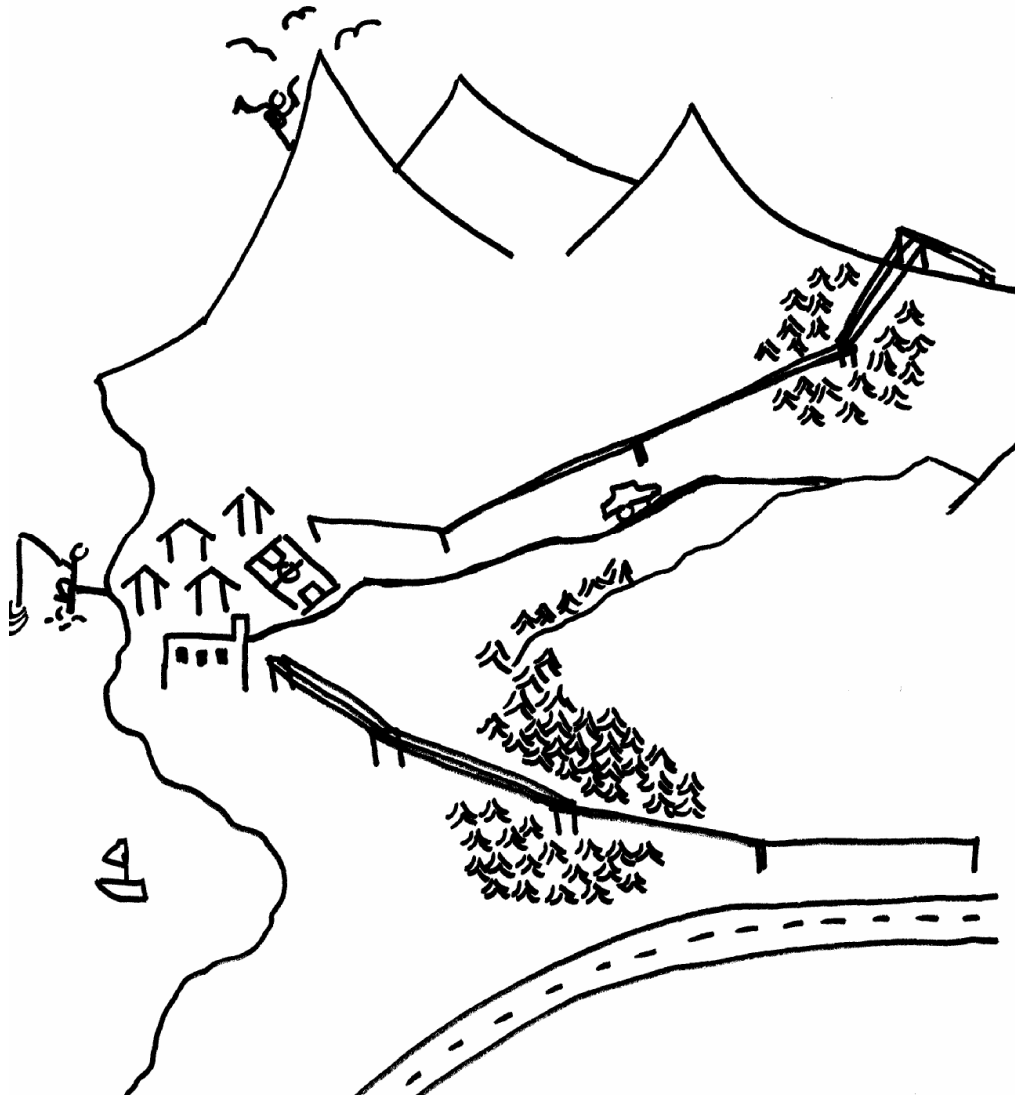
I første delkapittel gis en nærmere beskrivelse av casen og parametere som er lagt til grunn. På bakgrunn av dette etableres spesifikt utfallsrom og tilhørende sannsynligheter før en ser på konsekvensene ved de enkelte hendelsene. Med dette som utgangspunkt utføres sårbarhetsanalyse i form av tradisjonell ROS analyse og sårbarhetsindikatoren. Til slutt kommer en evaluering av de ulike tilnærmingene.

### 5.1 Beskrivelse av case

Utvik er en liten by ute ved havet med 6 000 innbyggere fordelt på 2500 husstander. I tillegg til trevarefabrikken byen er bygd opp rundt, finnes også en del mindre bedrifter samt en liten servicenæring. Maksimalt lastuttak for byen er 12 MW.

Byen forsynes gjennom to 22/66 kV linjer. Den eldste linjen ble bygget i 1956, i forbindelse med at trevarefabrikken ble satt i drift. Denne linjen går først parallelt med bilveien til Utvik opp gjennom dalføret, for så å transformeres opp til 66 kV før den går over et fjellområde til nettstasjonen i nabokommunen. Den andre linjen ble bygget i 1984 da tilflytting og økt næringsliv i Utvik førte til at behovet for kraft oversteg overføringsevnen til den første linjen. Denne linjen går et lite stykke langs kysten før også denne transformeres opp til 66kV og går inn i landet gjennom et skogsområde for så å følge E6 til nettstasjonen. Den nyeste linjen dekker alene maksimal last i Utvik, mens

linjen over fjellet ved full belastning dekker 50% av forbruket i en høylastsituasjon (6 MW). Ved utfall av 1984 linjen vil denne linjen kobles ut på grunn av overlast. Det tar 30 minutter å utføre nødvendige koblinger i lavspenningsnettet slik at deler av lasten kan kobles inn igjen. Alle kritiske samfunnsfunksjoner er utstyrt med nødaggregat.



Bilde 2 Illustrasjon av case

I utgangspunktet kan det virke urealistisk at en ikke har 100 % reserveforsyning for et så pass stort område i form av minst to separate, selvstendige innmatingsveier. Dette kan imidlertid representere en masket forsyning der deler av nettet faller ut. Den ene linjen

kan være en representasjon av flere linjer eller et nett som delvis klarer å forsyne et område. Steigen-tilfellet viser dessuten at 100% reserveforsyning ikke alltid er tilfellet.

### **Last**

Forbruket i den lille byen er naturlig nok fordelt på ulike kategorier. Tar en utgangspunkt i inndelingen brukt for fastsettelse av KILE, blir det relative forbruket som følger:

**Lastfordeling, normal forsyning**

<b>Kundegruppe</b>	<b>Andel (%)</b>
Industri	10
Handel og tjenester	10
Treforedling og kraftintensiv industri	30
Offentlig virksomhet	5
Jordbruk	5
Husholdning	40

**Tabell 10** Tabellen viser hvordan forbruket fordeler seg på de ulike sluttbrukergruppene ved normal forsyning

Maksimal last for byen er som tidligere nevnt 12 MW. Når byen utelukkende forsynes via 1956-linjen dekkes kun 50 % eller 6 MW av forbruket. I en slik situasjon vil uteblitt levering fordele seg på følgende måte:

**Fordeling uteblitt effekt, redusert forsyning**

<b>Kundegruppe</b>	<b>Andel ikke levert effekt (%)</b>
Industri	0
Handel og tjenester	0
Treforedling og kraftintensiv industri	35
Offentlig virksomhet	8
Jordbruk	7
Husholdning	50

**Tabell 11** Tabellen viser hvordan uteblitt effekt fordeler seg på de ulike sluttbrukergruppene ved redusert (halvert) forsyning

Denne selektive forsyningen er basert på rent økonomiske betraktninger (ulik avbruddskostnader for ulike kundegrupper). I virkeligheten må ofte andre momenter som liv og helse også tas i betraktning. Dette er forankret i Forskrift om leveringskvalitet i kraftsystemet der det i § 2-1 heter at "[t]ilknytningspunkt av betydning for liv og helse skal prioriteres". Slike forhold må undersøkes og vurderes i hvert enkelt tilfelle.

### **Beskrivelse av linjene:**

#### 22/66 kV FeAl fra 1956:

22 kV linjesegmentet består av to 75 mm<sup>2</sup> FeAl linjer, mens en for 66 kV strekket kun har en linje på 50 mm<sup>2</sup>. Oppgradering er gjort etter behov og i flere etapper. Ved en oppgradering i 1970 valgte en å erstatte trestolpene over fjellområdet med master etter erfaringer med sterke værpåkjenninger.

#### 22/66 kV FeAl fra 1984:

22 kV strekket består av to 150 mm<sup>2</sup> FeAl linjer, mens 66 kV strekket har en linje på 100 mm<sup>2</sup>. Her har en brukt trestolper for hele strekket.

Utgangspunkt for valg av kabler finnes i vedlegg 3. Her gis også en nærmere beskrivelse av linjetrassene. Dette danner grunnlag for følgende seksjonering:

Seksjonering av linjenettet

<b>Linjesegment</b>	<b>Linjekarakteristikk</b>	<b>Omgivelser</b>
Seksjon 1	22 kV, 75 mm <sup>2</sup> FeAl fra 1956, trestolper	Opp et dalføre langs en bilvei
Seksjon 2	66 kV, 50 mm <sup>2</sup> FeAl fra 1956, trestolper	Opp en skogkledd dalside
Seksjon 3	66 kV, 50 mm <sup>2</sup> FeAl fra 1956, master	Over et høyereliggende, åpent område
Seksjon 4	22 kV, 2x150 mm <sup>2</sup> FeAl fra 1984, trestolper	Langs strandkantet, på tvers av dalføret
Seksjon 5	66 kV, 100 FeAl mm <sup>2</sup> fra 1984, trestolper	Gjennom et skogsområde
Seksjon 6	66 kV, 100 FeAl mm <sup>2</sup> fra 1984, trestolper	Langs bilvei i et åpent, men lite utsatt område

Tabell 12 Tabellen viser inndeling i de ulike seksjonene, tilhørende linjekarakteristikker og de karakteristiske omgivelsene for hvert segment

## **5.2 Spesifikt utfallsrom**

Tabell 13 oppsummerer de aktuelle hendelsene som fremkommer i vedlegg 3. Dette er hendelser som gjør at linjer ikke er tilgjengelige, og krever umiddelbar reparasjon. Dette representerer spesifikt utfallsrom for denne casen.

### Casens spesifikke utfallsrom

Seksjon	Hendelse	Sannsynlighet
Seksjon 1	Avslitte aluminiumstråder	2
Seksjon 2	Trær i kontakt med linjer med mislykket gjeninnkobling	4
	Trær velter over linje	3
	Trær velter over stolpe	3
Seksjon 3	Lynnedslag gir jordfeil med mislykket gjeninnkobling	4
	Lynnedslag gir kortslutning med mislykket gjeninnkobling	4
	Lynnedslag fører til ødelagt bryter	3
	Lynnedslag fører til ødelagt transformator	1
	Vind gir fasesammenslag med mislykket gjeninnkobling	4
	Vind fører til at en mast bryter sammen	2
	Sterke vinder gir ødeleggelser over et større område	1
	Is og snø fører til at en mast velter	1
	Is/snø fører til at en linje ryker	2
	Is/snø faller ned og gir kortslutning ved at faser slår sammen	3
Seksjon 4	Saltbelegg fra sjøsprøyt gir overslag fra linje/isolator uten gjeninnkobling	3
	Saltbelegg fra sjøsprøyt gir (dobbel) jordslutning uten gjeninnkobling	3
	Vind gir fasesammenslag med mislykket gjeninnkobling	4
Seksjon 5	Vind gjør at trær velter over linje	3
	Vind gjør at trær kommer i kontakt med linjer med mislykket innkobling	3
	Vind gjør at trær velter over stolpe	3
	Sterke vinder fører til at trær velter over et stort område	1

Tabell 13 Tabellen viser det spesifikke utfallsrommet for dette caset. Hendelsene er plukket ut fra det generelle utfallsrommet presentert i kapittel 3.3 på grunnlag av linjebeskrivelser i vedlegg 3. Sannsynlighetene antas bestemt med utgangspunkt i avbruddstatistikk og erfaring.

Utgangspunkt for sannsynlighetsfordelingen er vist i tabell 14:

### Sannsynlighetskategorier

Kategori	Nivå	Beskrivelse av sannsynlighet (frekvens)
Meget sannsynlig	4	1 gang pr. år eller oftere
Sannsynlig	3	1 gang pr. 10 år eller oftere
Mindre sannsynlig	2	1 gang pr. 50 år eller oftere
Lite sannsynlig	1	Sjeldnere enn 1 gang pr. 50 år

Tabell 14 Sannsynlighetskategorier anbefalt av NVE og brukt i dette caset

For oversiktens skyld er utfallsrom for feil i enkelte tilfeller begrenset slik at problemer som kan oppstå flere steder i nettet analyseres der de mest karakteristisk oppstår. Problemer med saltbelegg håndteres for eksempel der linjen går langs sjø, til tross for at det også *kan* oppstå liknende problemer lenger inne i landet. Denne tilnærmingen er valgt for å gjøre eksemplet mer oversiktlig og lettere å følge.

Videre har en sett bort fra feil i seksjon 6 ettersom denne strekningen ikke er karakterisert av noen spesiell værtype og ligger lett tilgjengelig. En antar dermed lav værrelatert feilfrekvens og kort utetid dersom noe først skulle skje.

### 5.3 Konsekvenser

Klassifisering av økonomisk konsekvens er basert på ”Veiledning til forskrift om beredskap i kraftforsyningen”, og er som følger:

Konsekvenskategorier		
Vurdering	Konsekvens	Økonomiske verdier
Ufarlig	1	Skader opp til 10 000 kr
En viss fare	2	Skader opp til 100 000
Farlig	3	Skader opp til 1 mill
Kritisk	4	Skader opp til 10 mill
Katastrofal	5	Skader over 10 mill

Tabell 15 Konsekvenskategorier anbefalt av NVE og brukt i dette caset

Beregninger vist i vedlegg 4 gir følgende klassifisering av hendelsene i utfallsrommet:

Klassifisering av totale økonomiske kostnader			
Seksjon	Hendelse	Kostnad	Konsekvens
Seksjon 1	Avslitte aluminiumstråder	44 150	2
Seksjon 2	Trær i kontakt med linjer med mislykket gjeninnkobling	2 100	1
	Trær velter over linje	42 350	2
	Trær velter over stolpe	91 500	2



Seksjon 3	Lynnedslag gir jordfeil med mislykket gjeninnkobling	5 600	1
	Lynnedslag gir kortslutning med mislykket gjeninnkobling	5 600	1
	Lynnedslag fører til ødelagt bryter	16 700	2
	Lynnedslag fører til ødelagt transformator	67 000	2
	Vind gir fasesammenslag med mislykket gjeninnkobling	5 600	1
	Vind fører til at en mast bryter sammen	136 000	3
	Sterke vinder gir ødeleggelser over et større område	1 345 000	4
	Is og snø fører til at en mast velter	136 000	3
	Is/snø fører til at en linje ryker	49 700	2
	Is/snø faller ned og gir kortslutning ved at faser slår sammen	5 600	1
Seksjon 4	Saltbelegg fra sjøsprøyt gir overslag fra linje/isolator uten gjeninnkobling	208 102	3
	Saltbelegg fra sjøsprøyt gir (dobbel) jordslutning uten gjeninnkobling	208 102	3
	Vind gir fasesammenslag med mislykket gjeninnkobling	208 102	3
Seksjon 5	Vind gjør at trær velter over linje	625 672	3
	Vind gjør at trær kommer i kontakt med linjer med mislykket innkobling	438 458	3
	Vind gjør at trær velter over stolpe	987 550	3
	Sterke vinder fører til at trær velter over et stort område	13 321 606	5

**Tabell 16** Tabellen viser hendelsene i det spesifikke utfallsrommet og de totale økonomiske kostnadene knyttet til disse hendelsene. Totale økonomiske kostnader er konsekvensvurdert ut fra NVE sine anbefalinger

For ordens skyld er det greit å understreke at slike standardiserte vurderinger ikke nødvendigvis gir en god pekepinn på økonomisk belastning, da selskaper vil ha ulik evne til å håndtere uventede økonomiske tap. Dette kommer blant annet an på selskapets størrelse og økonomisk filosofi. Nettselskaper bør i størst mulig grad selv foreta en konsekvensvurdering av økonomiske tap i eget nett.

### Liv og helse

Veiledningen anbefaler at også disse områdene konsekvensvurderes, og overstyrer den økonomiske vurderingen der alvorlighetsgraden tilsier dette (dvs der konsekvenser for liv og helse er større enn de økonomiske konsekvensene).

En vurdering av casen tyder på at dette ikke vil være tilfellet her. Linjens beliggenhet samt type hendelser tilsier at sjansene for direkte skade (både på personer og miljø) som følge av avbruddshendelsene er små. Alle kritiske funksjoner er utstyrt med nødaggregat, og kun en hendelse gir i seg selv lang avbruddstid som indirekte kan være en trussel mot liv og helse. Denne hendelsen er allerede klassifisert i kategori 5 – den mest alvorlige.

Direkte konsekvenser for liv og helse er kanskje mer aktuelt for deler av kraftsystemet der mennesker oppholder seg regelmessig eller der årsak til hendelse er menneskelig svikt. Unntaket kan være fare ved reparasjonsarbeid i skog med stort nedfall av trær og lange utetider, men denne hendelsen er som tidligere kommentert allerede klassifisert i kategori 5.

### 5.5 ROS analyse

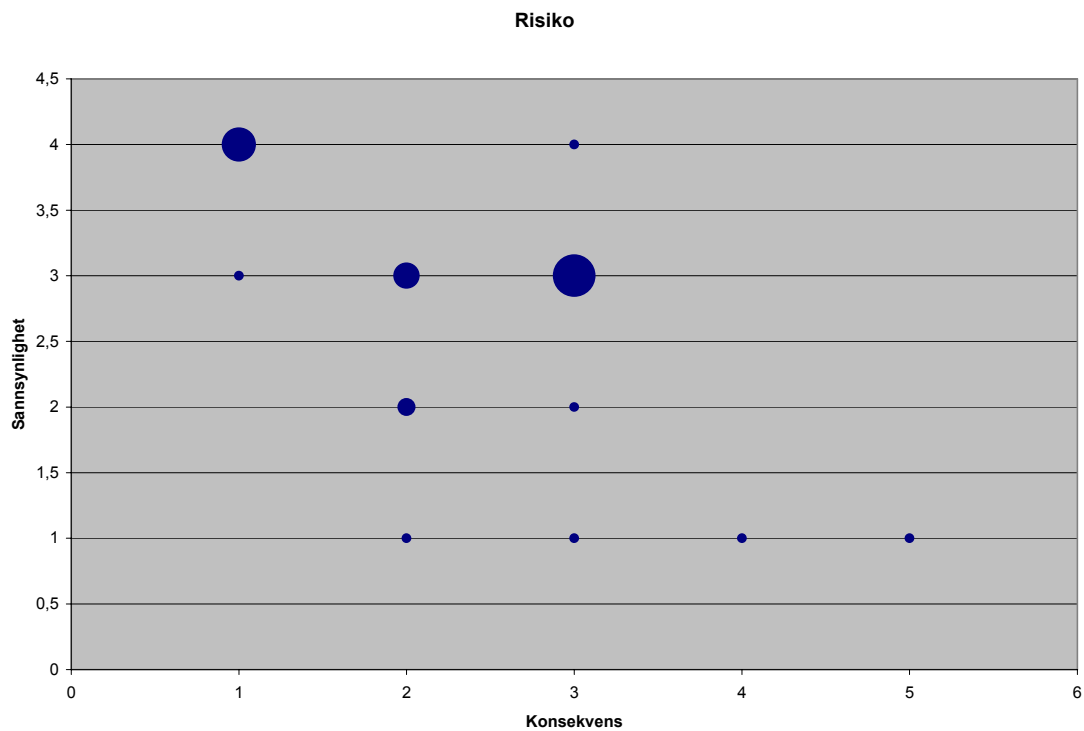
ROS analysen bygger på konsekvensvurderinger fra kapittel 5.4 og sannsynligheter oppgitt i 5.3. Tabell 17 viser risikomatrisen ROS-analysen baseres på.

**Risikomatrise**

Sannsynlighet	Konsekvens				
	Ufarlig 1	En viss fare 2	Farlig 3	Kritisk 4	Katastrofalt 5
Meget sannsynlig 4	4	8	12	16	20
Sannsynlig 3	3	6	9	12	15
Mindre sannsynlig 2	2	4	6	8	10
Lite sannsynlig 1	1	2	3	4	5

**Tabell 17 Risikomatrisen som danner utgangspunkt for vurdering i ROS-analysen**

Figur 19 viser grafisk hvordan hendelsene fordeler seg i forhold til risiko. Her representerer størrelsen på sirklene antall hendelser med en gitt poengsum. Tabell med utregning av risiko er gitt i vedlegg 5. På neste side ser en hvordan det spesifikke utfallsrommet fordeler seg i risiko matrisen.



**Figur 19 Grafisk fremstilling av hvordan utfallsrommet fordeler seg i forhold til sannsynlighet, konsekvens og risiko**

### ROS diagram

<b>4</b>	<b>8</b>	<b>12</b>	<b>16</b>	<b>20</b>
<u>Seksjon 2</u> (*) Trær i kontakt med linjer uten gjeninnkobling  <u>Seksjon 3</u> (*) Lynnedslag gir jordfeil uten gjeninnkobling (*) Lynnedslag gir kortslutning uten gjeninnkobling (*) Vind gir fasesammenheng uten gjeninnkobling		<u>Seksjon 4</u> (*) Fasesammenheng uten gjeninnkobling		
<b>3</b>	<b>6</b>	<b>9</b>	<b>12</b>	<b>15</b>
<u>Seksjon 3</u> (*) Is/snø gir kortslutning uten gjeninnkobling	<u>Seksjon 2</u> (*) Trær velt over linje (*) Trær velt over stolpe <u>Seksjon 3</u> (*) ødelagt bryter	<u>Seksjon 4</u> (*) Saltbelegg gir overslag uten gjeninnkobling (*) Saltbelegg gir (dobbel) jordslutning uten gjeninnkobling <u>Seksjon 5</u> (*) Trær velt over linje (*) Trær i kontakt med linjer uten gjeninnkobling (*) Trær velt over stolpe		
<b>2</b>	<b>4</b>	<b>6</b>	<b>8</b>	<b>10</b>
	<u>Seksjon 1</u> (*) Avslitte aluminiumstråder <u>Seksjon 3</u> (*) Is og snø gir ødelagt linje	<u>Seksjon 3</u> (*) Mast bryter sammen		
<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>
	<u>Seksjon 3</u> (*) ødelagt transformator	<u>Seksjon 3</u> (*) Is og snø velt en mast	<u>Seksjon 3</u> (*) Ødelagelser over et større område	<u>Seksjon 5</u> (*) Trær velt over et stort område

Tabell 18 Risikomatrix inntegnet hendelsene i det spesifikke utfallsrommet i casen

Disse fremstillingene viser at en rekke hendelser gjør seg gjeldende i et risiko- og sårbarhetsperspektiv. Tendensen synes å være at hendelser med høy konsekvens har lav sannsynlighet for å inntreffe og omvendt. Hovedvekten ligger på hendelser med relativt sett lavere konsekvens og høyere frekvens. Dette må sies å være forventet ettersom uakseptable hendelser (i.e. høy frekvente høy konsekvens hendelser) elimineres ved utbygging eller når de oppstår.

Risiko gir følgende prioriterte rekkefølge:

1. Fasesammenslag i seksjon 4
2. Overslag eller jordslutning i seksjon 4, trær i kontakt med linje, over linje eller over stolpe i seksjon 5
7. Trær over linje eller stolpe i seksjon 2, ødelagt bryter eller mast i seksjon 3
11. Store fysiske ødeleggelser i seksjon 5

Størst risiko er knyttet til fasesammenslag i seksjon 4. Her er verdien 12, og dette er i følge veiledning til beredskapsnorm en uakseptabel risiko<sup>9</sup> som krever tiltak. Videre kan det være verdt å merke seg hendelsene som i følge normen vurderes til å ha middels risiko, og der iverksettelse av tiltak må vurderes. Dette gjelder i første rekke de fem hendelsene med verdi 9 og deretter de fire hendelsene med verdi 6.

Det kan også være hensiktsmessig å se på hvilke hendelser som har enten høy konsekvens eller høy sannsynlighet. I forhold til høy konsekvens vil det være aktuelt å vurdere om hendelsene kan aksepteres ettersom de skjer så pass sjeldent. Er ikke dette tilfellet, bør tiltak iverksettes selv om risikoen ikke er uakseptabel. Her scorer ikke uventet hendelsene med utstrakt fysiske ødeleggelser høyest. I slike tilfeller må en ofte vurdere om det i hele tatt er mulig å gardere seg mot alle eventualiteter og hva kostnadene ved dette eventuelt blir. Det er som tidligere nevnt i oppgaven et åpent spørsmål hvor forsyningssikkert det lønner seg at systemet skal være. I dette tilfellet gjelder dette ødeleggelser på grunn av is/snø og vind i seksjon 3 og på grunn av vind og

---

<sup>9</sup> Dette gjelder som nevnt i vedlegg 1 risiko fra og med verdien 10

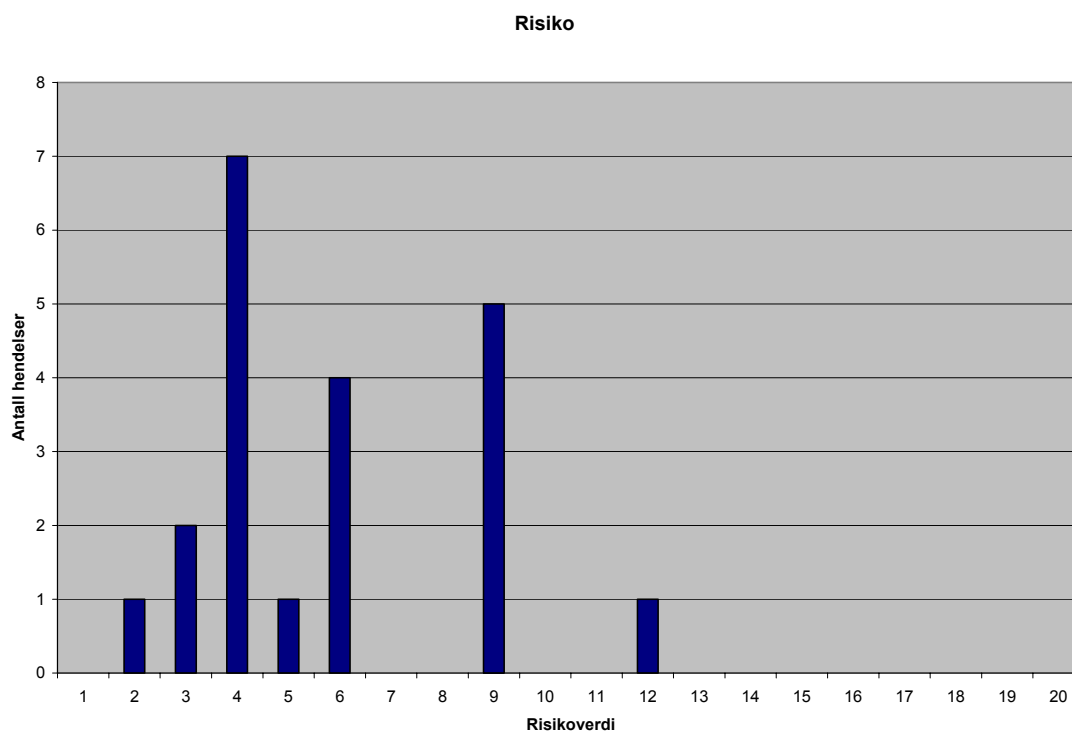
trefall i seksjon 5 (som for øvrig også kommer inn i kategorien moderat risiko).

Eventuelle tiltak vil være økt reserveforsyning slik at effekten av hendelsene reduseres og oppgradering til et mer robust system slik at sannsynligheten for at de hender blir enda mindre.

Reduksjon av hendelser med høy sannsynlighet kan være lønnsomt tross begrensede konsekvenser der tiltakene har en akseptabel pris. Sårbarhetsreduksjon til en billig penge! Dette reduserer ikke bare sårbarhet kvantitativt, men gjør også at forsyningen føles sikrere for sluttbrukere i og med at antall avbrudd (selv om det kanskje er de korteste bruddene) går ned. Slike hendelser er som regel ikke kritiske, men kan være irriterende og øker følelsen av sårbarhet.

Når en ser på høy sannsynlighet har en fem hendelser som skjer en gang pr år eller oftere. Fire av disse gir minimal konsekvens (1 på skalaen) og er knyttet til mislykket gjeninnkobling i reservelinjen (trær i seksjon 2 og lyn eller fasesammenslag i seksjon 3). Tiltak her bør iverksettes dersom frekvens og kostnader ved utbedring tilsier dette. Tiltak det kan være aktuelt å se på er hyppigere vedlikehold av traseen i seksjon 2, inspeksjon av toppline og avstandsholdere i seksjon 3.

Resultatet kan også vises i et stolpediagram:



**Figur 20** Stolpediagram som viser antall hendelser pr risikoverdi (produktet av konsekvens og sannsynlighet)

### Vurdering

Under vises en tabell over hendelser som utmerker seg i ROS-analysen, hvorfor de utmerker seg, om tiltak er pålagt og hvilke tiltak som eventuelt kan iverksettes.

#### Vurderingsgrunnlag for sårbarhet

Hendelse	Bakgrunn for utvalg	Pålagt handling	Mulige nettorienterte tiltak
Inspeksjon etter fasesammenslag seksjon 4	Høy risiko	Iverksette tiltak	Avstandsholdere
Inspeksjon seksjon 4 etter overslag	Middels risiko	Vurdere tiltak	Inspeksjon/vedlikehold i forhold til saltbelegg
Inspeksjon seksjon 4 etter jord Slutning	Middels risiko	Vurdere tiltak	Inspeksjon/vedlikehold i forhold til saltbelegg
Trær over linje seksjon 5	Middels risiko	Vurdere tiltak	Oftere vedlikehold eller beredere traseer
Inspeksjon etter kontakt med trær seksjon 5	Middels risiko	Vurdere tiltak	Oftere vedlikehold eller beredere traseer

Trær over stolpe seksjon 5	Middels risiko	Vurdere tiltak	Oftere vedlikehold eller beredere traseer
Trær over linje seksjon 2	Middels risiko	Vurdere tiltak	Oftere vedlikehold eller beredere traseer
Trær over stolpe seksjon 2	Middels risiko	Vurdere tiltak	Oftere vedlikehold eller beredere traseer
Ødelagt bryter seksjon 3	Middels risiko	Vurdere tiltak	Inspeksjon/vedlikehold av toppline, isolasjon og lynavleder, endret vern eller innstilling av dette
Ødelagt mast seksjon 3	Middels risiko	Vurdere tiltak	Oppgradering
Store ødeleggelser seksjon 5	Høy konsekvens	Vurdere tiltak	Bredere traseer, oppgradering
Store ødeleggelser seksjon 3	Høy konsekvens	Vurdere tiltak	Oppgradering
Inspeksjon seksjon 2 etter kontakt med trær	Høy sannsynlighet	Vurdere tiltak	Oftere vedlikehold av traseer, bredere traseer, endret vern eller innstilling av dette for å øke rate for gjeninnkobling
Inspeksjon etter jordfeil seksjon 3	Høy sannsynlighet	Vurdere tiltak	Inspeksjon/vedlikehold av toppline og isolasjon, endret vern eller innstilling av dette
Inspeksjon etter kortslutning seksjon 3	Høy sannsynlighet	Vurdere tiltak	Inspeksjon/vedlikehold av toppline og isolasjon, endret vern eller innstilling av dette
Inspeksjon etter fasesammenslag seksjon 3	Høy sannsynlighet	Vurdere tiltak	Avstandsholdere

**Tabell 19** Tabellen viser hendelser som utmerker seg i ROS analysen, hvorfor de utmerker seg og om og hvordan en kan forholde seg til disse hendelsene.

Det eneste tiltaket som må iverksettes er installasjon av avstandsholdere seksjon 3. Det er imidlertid klart at en har en rekke hendelser som påvirker sårbarheten i systemet, og en gjennomgang av ytterligere tiltak må ses på som fornuftig i denne sammenheng. Dette kan for eksempel danne basis for en tiltaksplan som inneholder en prioritert rekkefølge over tiltak og når de bør gjennomføres (f.eks umiddelbart, ved neste vedlikehold, ved neste avbrudd, på lengre sikt osv).



Tiltak det kan være interessant å vurdere:

- Gjennomgang av vedlikeholdsrutiner i traseene for seksjon 2 og 5 som går gjennom skog. Eventuelt kan en vurdere å øke trasebreddene men dette er ressurskrevende og kostbart samtidig som det kan endre landskapsbildet.
- Se på vern for seksjonene 3 og 4 og vurdere om innstillinger kan endres eller om det vil være gunstig å oppgradere systemet for å øke antallet automatiske gjeninnkoblinger og redusere antall ødelagte brytere.
- I seksjon 4 kan en dessuten vurdere tiltak for å redusere saltbelegg eller konsekvensene av dette.

Dette kan danne utgangspunkt for følgende handlingsplan:

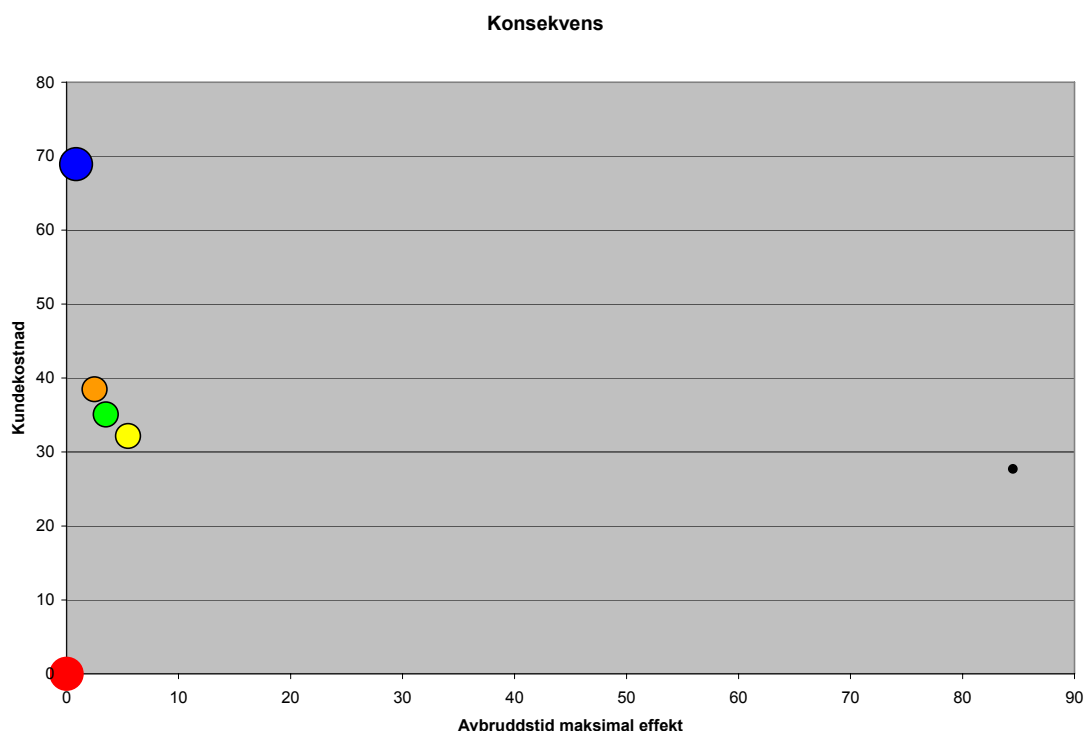
1. Installer avstandsholdere i seksjon 4
2. Vurder vedlikeholdsrutiner i skogsområdene
3. Se på innstillinger av vern

## 5.6 Sårbarhetsindikator

Maksimal last er som nevnt 12 MW. Ved redusert forsyning (når 1984 linjer er ute av drift) leveres kun 6 MW av denne effekten. Ved utfall av hovedlinjen vil all forsyning være ute i 30 minutter før redusert forsyning kommer i gang. Dette gir tre mulige tilstander; full forsyning, delvis forsyning og ingen forsyning. Det er de to siste tilstandene som er interessante i denne sammenheng.

KILE for disse to tilstandene vil være 26,46 NOK/kWh ved fullstendig avbrudd og 11,42 NOK/kWh ved redusert forsyning (beregning er vist i vedlegg 6).

Figur 21 viser hvordan utfallsrommet plasserer seg i forhold til avbruddstid for maksimal effekt og gjennomsnittlig kundekostnad pr time. Sirkelarealet angir sannsynligheten for at hendelser inntreffer. Enkelte hendelser gir samme utslag, og dette øker sannsynlighet (og dermed størrelse) for et gitt punkt. Grunnlaget for figuren er beskrevet i vedlegg 6.



**Figur 21 Konsekvens av ulike hendelser. Kundekostnaden er gitt ved NOK pr kunde pr time**

Figur 21 viser at en rekke hendelser ikke gir direkte konsekvenser for kundene. Disse hendelsene er markert med rødt i figuren, og befinner seg alle i origo ettersom de ikke gir avbrudd og dermed heller ikke konsekvenser for kunder. Dette gjelder hendelser som setter reservelinjen (1956-linjen) ut av spill. Dette er til sammen 14 hendelser som i sum har en sannsynlighet lik 4 (oftere enn en gang i året).

Av hendelsene som gir direkte konsekvenser for samfunnet (representert ved kunder og samfunnsfunksjoner), er det i første rekke en hendelse som skiller seg ut i forhold til lang avbruddstid. Dette er hendelsen store fysiske ødeleggelser i seksjon 5. Hendelsen er markert ved sorte sirkelen i figuren. Sirkelarealet indikerer at dette forventes sjeldnere enn en gang pr 50. år (sannsynlighet lik 1 eller frekvens mindre enn 0,02 pr år).

De tre hendelsene i seksjon 4 (overslag, jordslutning, fasesammensalg) har størst spesifikke kostnader (men dog kort utetid). Disse er representert ved den blå sirkelen.

Sirkelarealet her er like stort som for den røde sirkelen, og utfall på grunn av disse hendelsene har dermed også en sannsynlighet lik 4 (oftere enn en gang i året).

Med noe lavere spesifikk gjennomsnittlig kostnad, men lenger avbruddstid har en hendelse i seksjon 5 der trær enten kommer i kontakt med linje (orange), velter over linje (rød) eller velter over stolpe (gul). Hver for seg har disse hendelsene en sannsynlighet lik 3 (en gang pr 10. år eller oftere).

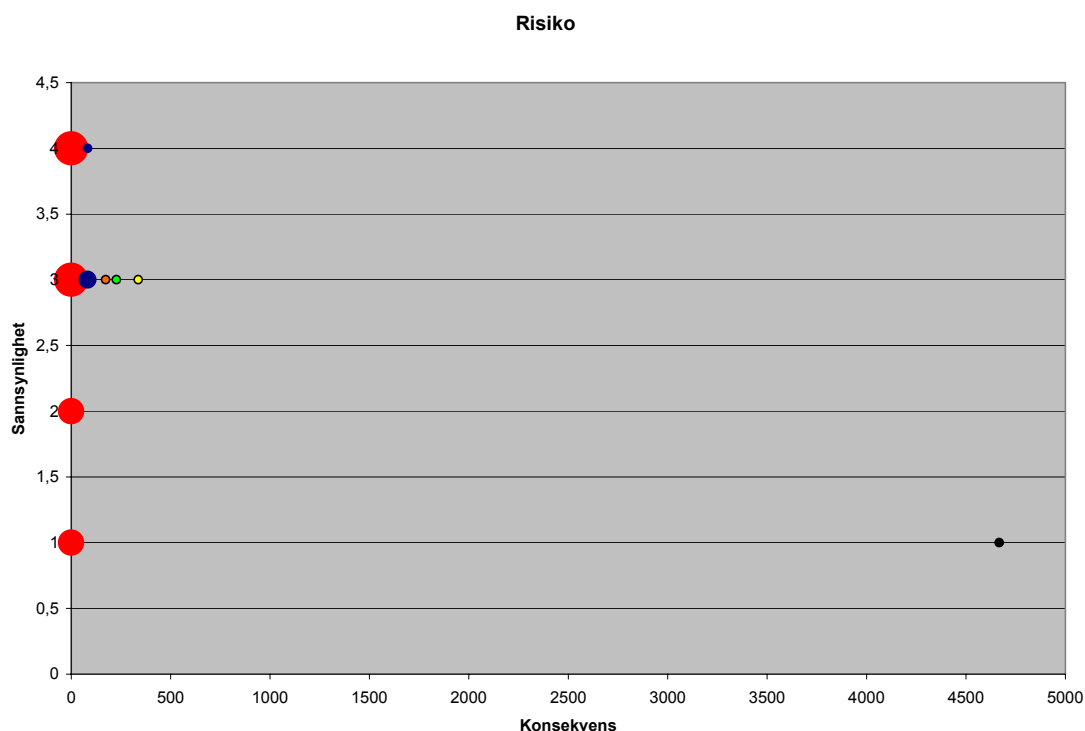
Avbrudd er relativt vanlig, men da med begrenset varighet. Ansamling av hendelsene til venstre i figuren (kort varighet) indikerer at det kan være verdt å gå gjennom rutiner for vedlikehold og eventuelle oppgraderinger. Avstandsholdere og tiltak for å redusere konsekvenser av saltbelegg i seksjon 4 er tiltak som kan vurderes. Det kan også være verdt å evaluere vedlikehold av traseen i seksjon 5 og eventuelt vurdere om denne bør økes. Et alternativ er å se på vernløsninger som øker sjansene for vellykket gjeninnkobling.

#### Vurderingsgrunnlag sårbarhet

Seksjon	Tiltak
Seksjon 4	Vedlikehold/utskiftning av komponenter for å redusere saltbelegg, endre vern eller innstilling av dette for å øke gjeninnkoblingsrate, montering av avstandsholdere
Seksjon 5	Økt vedlikehold av traseene, økt trasebredde

**Tabell 20** Tabellen viser seksjonene som utmerker seg på sårbarhetsindikatoren, og hvilke tiltak som er aktuelle

Ser en på risiko i form av total kostnad pr kunde og sannsynlighet får en resultatet vist i figur 22. Her er farekodingen for de ulike hendelsene lik den brukt i figur21.



**Figur 22 Grafisk fremstilling av risiko med utgangspunkt i sårbarhetsindikatoren. Sannsynlighetene tilsvarer de brukt i ROS-analysen og er oppgitt i kapittel 5.2. Konsekvensene er vist ved totale gjennomsnittlige kostnader pr kunde pr avbrudd**

Figur 22 viser gjennomsnittlig total kostnad pr kunde for en hendelse sammen med sannsynligheten for at den inntreffer. Denne fremstillingen viser forskjeller som forsvinner når de økonomiske konsekvensene kategoriseres slik som i ROS-analysen.

Rangert etter risiko får en følgende prioriterte liste:

1. Store fysiske skader i seksjon 5 på grunn av vind og trær (sort sirkel)
2. Trær over stolpe i seksjon 5 (gul sirkel)
3. Trær over linje i seksjon 5 (grønn sirkel)
4. Kortslutning på grunn av trær i seksjon 5 (orange sirkel)
5. Fasesammenslag uten gjeninnkobling i seksjon 4 (den minste blå sirkelen)
6. Feilhendelser knyttet til saltbelegg i seksjon 4 (den største blå sirkelen)

Resterende hendelser har ingen risiko knyttet til seg i.

Her skiller hendelse nr 1 seg kraftig ut på grunn av relativt sett høy konsekvens. Konsekvensene av en slik hendelse tilsvarer en kostnad på over 4 500 NOK pr sluttbruker. Det er også interessant å merke seg at de neste tre punktene på listen også er et resultat av vind og trær i seksjon 5. Dette kan tyde på at en økning i trasebredde absolutt er verdt å vurdere, og kan være en måte å redusere sårbarheten betraktelig på.

Når det gjelder feilhendelser i seksjon 4 er det ved første øyekast installasjon av avstandsholdere som bør prioriteres for å minske sårbarhet knyttet til vind. Saltbelegg kan imidlertid utløse to hendelser, og en endelig beslutning må utgangspunkt i erfaring (i.e. mer nøyaktig hendelsesfrekvens enn kategoriene brukt her). Dersom de to feilhendelsene knyttet til saltbelegg ligger opp mot kategori 4 (dvs at det skjer nesten hvert år eller i alle fall relativt ofte), vil det i utgangspunktet være lønnsomt å fokusere på disse hendelsene. Dersom de på den andre siden skjer relativt sjeldent (opp mot en gang pr 10 år) vil det lønne seg å fokusere på den vindrelaterte hendelsen. Dersom en ved hjelp av korrigeringer i vernsystemet kan redusere antall mislykkede gjeninnkoblinger vil naturlig nok dette virke inn på frekvensen av alle de tre hendelsene, og dette kan i så måte være den beste løsningen. Sårbarhet i denne oppgaven er definert i forhold samfunnsmessig funksjonsdyktighet noe som i utgangspunktet gjør kostnader ved utbedringsarbeidet mindre relevant. Det vil imidlertid som forklart i presentasjonen av sårbarhetsindikatoren i kapittel 2.4 være relevant i hvilke tiltak ansvarlige aktører velger å gjennomføre.

Det at en så stor andel av hendelsene ikke gir øyeblikkelige konsekvenser kan ved første øyeblikk tyde på at lokalsamfunnet er lite sårbart i og med at mange hendelser ikke reduserer funksjonsdyktigheten. Men i og med at det her er snakk om et område med to forsyningslinjer der kun en av linjene er i stand til alene å opprettholde forsyningen, representerer denne store andelen i virkeligheten at all reserveforsyning er borte. Et avbrudd i en slik tilstand vil gi langt høyere spesifikk avbruddskostnad samtidig som en avbruddstiden øker betraktelig. Som en videreføring av denne analysen hadde det dermed vært interessant å analysere forholdene dersom to feil overlapper hverandre. Dette gir inntrykk av potensiell sårbarhet. Viktigheten av dette forsterkes ved at reservelinjen ikke

trengs ved vanlig drift, og at det dermed kan være fristende å se på reparasjoner i denne delen av nettet som mindre presserende.

### **Vurdering**

Sårbarhetsindikatoren viser at det er manglende forsyningssikkerhet og ikke lange avbruddstider som reduserer forsyningssikkerheten og dermed sårbarheten. Med dette menes at avbruddene i de aller fleste tilfeller er kortvarige, men at relativt mange ulike årsaker skaper avbrudd. Samtidig har en også mange hendelser som ikke direkte gir forsyningsbrudd, men som fjerner det som finnes av reserveforsyning

Vurderinger knyttet til sårbarhetsindikatoren kan gi følgende handlingplan:

1. Brede traseer i seksjon 5
2. Se på innstillinger av vern for seksjon 4 og vurder eventuelle oppgraderinger
3. Nærmere vurdering av hvilke tiltak som bør settes i gang i seksjon 4 basert på en mer detaljert sannsynlighetsfordeling

### **5.8 Tiltak**

De to foregående delkapitlene har gitt følgende bidrag når det gjelder hvilke tiltak som bør og må gjennomføres:

ROS analysen foreslår følgende:

1. Installer avstandsholdere i seksjon 4
2. Vurder vedlikeholdsrutiner i skogsområdene (i prioritert rekkefølge seksjon 5 og 2)
3. Se på innstillinger av vern (i prioritert rekkefølge seksjon 4 og 3)

Sårbarhetsindikatoren legger følgende føringer:

1. Brede traseer i seksjon 5
2. Se på innstillinger av vern for seksjon 4 og vurder eventuelle oppgraderinger

3. Nærmere vurdering av hvilke tiltak som bør settes i gang i seksjon 4 basert på en mer detaljert sannsynlighetsfordeling

Basert på definisjonen på sårbarhet lagt til grunn i denne oppgaven gir dette følgende handlingsplan:

1. Avstandsholdere i seksjon 4 for å overholde norm
2. Økt trasebredde i seksjon 5
3. Tiltak for å redusere utkobling grunnet saltbelegg i seksjon 4 (vern, vedlikehold, bytte komponenter)
4. Evaluere vedlikehold i seksjon 2 og vern i seksjon 3

Her blir avstandsholdere prioritert foran økt trasebredde fordi overholdelse av norm antas som en grunnforutsetning.

## 5.9 Evaluering

Hensikten med denne casen var å undersøke om det utvidede sårbarhetsperspektivet basert på tradisjonell ROS-analyse og sårbarhetsindikatoren formidler sårbarhet på en hensiktsmessig måte, og om bruk av sårbarhetsindikatoren gir økt forståelse.

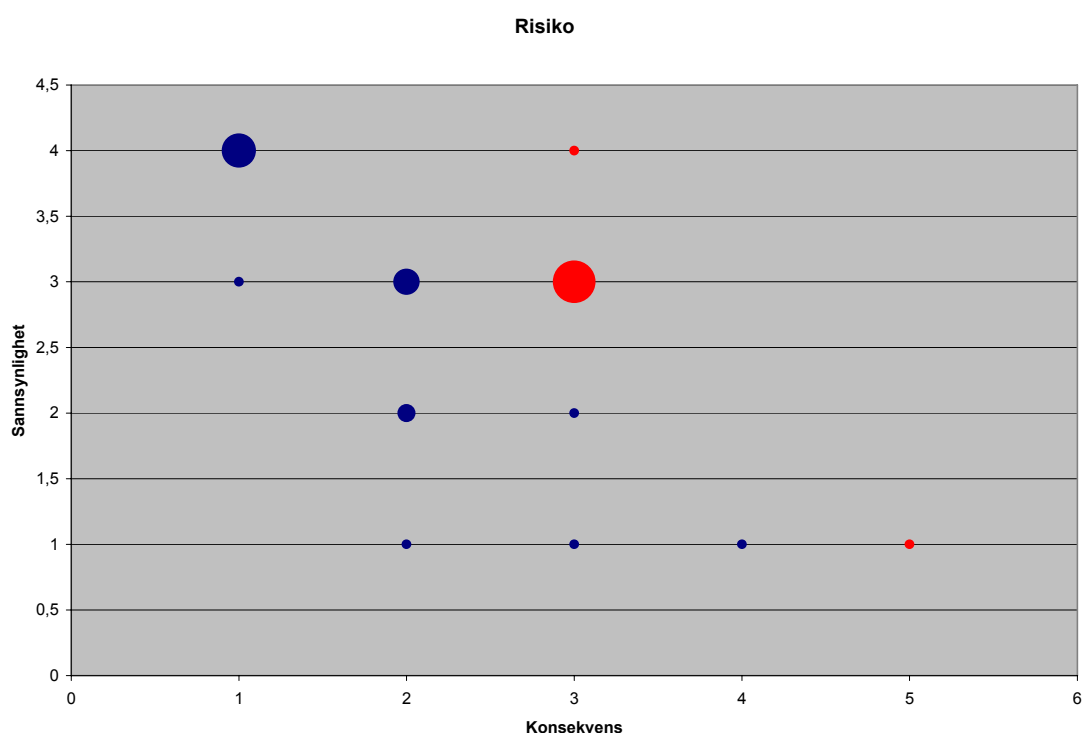
Aller først kan det være greit å påpeke at i dette tilfellet fører ikke klimarelatert sårbarhet i nettet til uakseptable forhold for liv og helse. Dermed er det de økonomiske forholdene som legges til grunn for ROS-analysen og sårbarhetsindikatoren. I andre tilfeller kan liv og helse komme inn og overstyre disse vurderingene.

I ROS vurderes risiko og sårbarhet med utgangspunkt i en hendelses totale kostnader (herunder total avbruddstid) og sannsynlighet for at hendelsen inntreffer.

Sårbarhetsindikatoren tar på sin side utgangspunkt i kundekostnader, normalisert avbruddstid og sannsynlighet. Aller først i evalueringen kan det være på sin plass å se på hva de ulike utgangspunktene hadde å si for resultatet.

### Sammenligning av ROS og sårbarhetsindikator

Når det gjelder ROS analyser er det knyttet risiko til alle hendelser i det spesifikke utfallsrommet, og en ser ikke direkte hvilke som kun gir konsekvenser for nettselskapet, og hvilke som gir nedsatt funksjonsdyktighet i samfunnet. Dette kan markeres ved å fargekode figuren. Røde hendelser indikerer forsyningsavbrudd, mens blå hendeler tar bort reserveforsyningen.

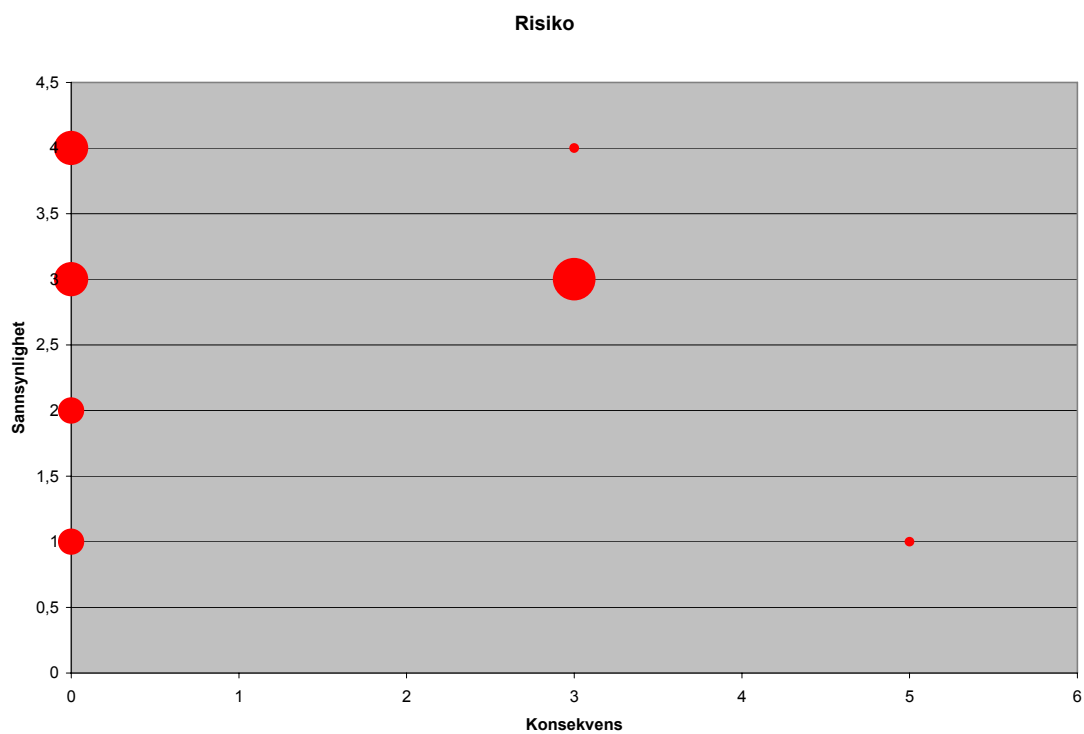


**Figur 23 Risiko fra ROS-analysen. Hendelsene som gir avbrudd for sluttbrukere (dvs driftsforstyrrelser på hovedlinjen) er røde, mens øvrige hendelser (tilhørende resevelinjen) er blå. Størrelse på sirklene angir sannsynlighet.**

På denne måten får en markert ut de samme tre punktene som sårbarhetsindikatoren legger vekt på.

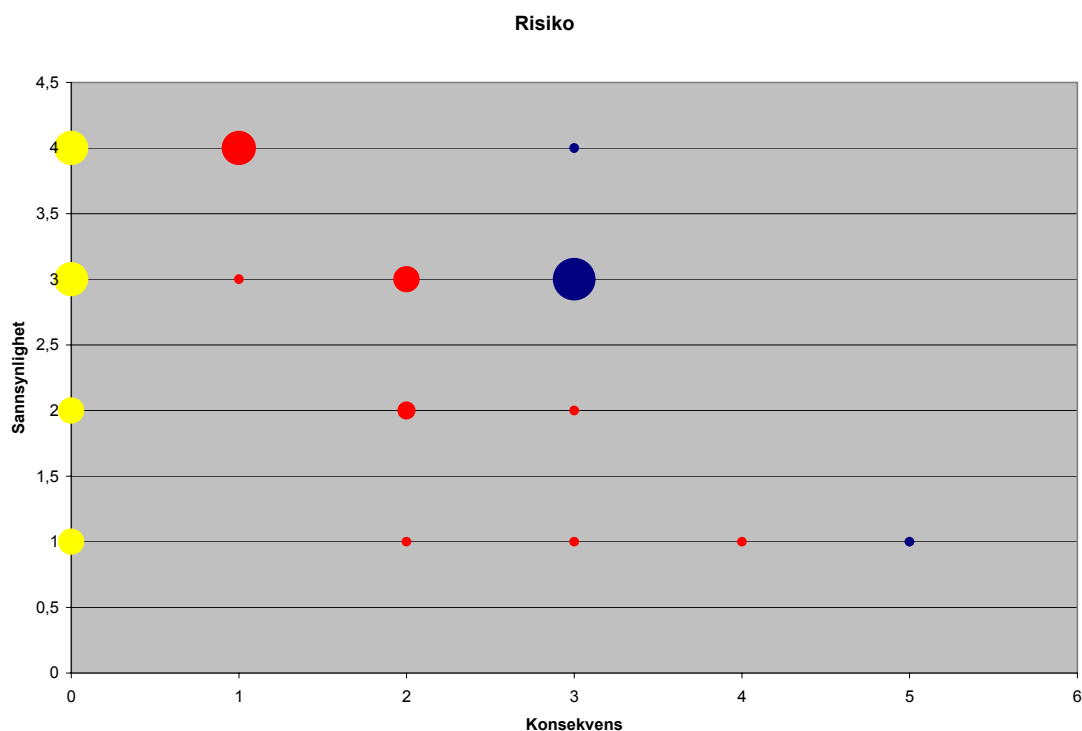
Videre kan en kategorisere risiko funnet ved sårbarhetsindikatoren med utgangspunkt i ROS kategoriene:





**Figur 24 Risiko med utgangspunkt i sårbarhetsindikatoren, men med kategoriene for konsekvens og sannsynlighet brukt i ROS-analysen. Størrelse på sirklene angir sannsynlighet.**

Sette en resultatet for risiko for ROS analysen og sårbarhetsindikatoren inn i samme figur får en følgende resultat:



**Figur 25 Risiko hentet fra både ROS-analysen og sårbarhetsindikatoren. Blå hendelser fremkommer i begge metodene, røde kun i ROS-analysen og gule kun for sårbarhetsindikatoren. Størrelse på sirkelene angir sannsynlighet.**

Her indikerer gule rundinger punkter som kun markeres ved sårbarhetsindikatoren, røde rundinger punkter som kun markeres i ROS analysen, og blå rundinger hendelser som forekommer i begge analysene. Størrelse indikerer antall hendelser i et gitt punkt. Her ser en at summen av ”røde hendelser” summert for en sannsynlighet tilsvarer summen av gule hendelser for samme sannsynlighet. Dette er de hendelsene som ikke gir direkte avbrudd, og som ikke får konsekvens i følge sårbarhetsindikatoren, men som fordeler seg utover og får en registrert risiko i ROS analysen.

I dette tilfellet er risiko for hendelser som gir direkte avbrudd like for ROS-matrisen og det utvidede perspektivet. Det er dermed nyansene i sårbarhetsindikatoren (ettersom denne ikke er oppdelt i kategorier) som gir ulik prioritering her. Dette trenger ikke å være tilfellet for hendelser med store ressurskostnader men begrenset avbruddstid. I slike tilfeller kan konsekvens og dermed også risiko reduseres i det utvidede perspektivet, og dermed miste relativ viktighet. Sårbarhetsindikatoren har dermed potensial til å

nedjustere hendelser som koster nettselskapet, men som ikke gir like stor funksjonsdyktighet i samfunnet.

Med utgangspunkt i sårbarhetsperspektivet lagt til grunn i denne oppgaven gir sårbarhetsindikatoren en mer ”fokuset” liste i og med at hendelser som ikke umiddelbart gir nedsatt funksjonsdyktighet får verdien 0 på begge indikatorene<sup>10</sup>. Den prioriterer med utgangspunkt i reel opplevd sårbarhet slik det er definert i denne oppgaven. Introduksjon av sårbarhetsindikatoren reduserer hensynet til bedriftsøkonomiske forhold som til en viss grad vil spille inn i alle beslutningsprosesser (selv om det ikke inngår i sårbarhetsbegrepet i denne oppgaven). Dette blir dermed en liste over hva som ideelt sett burde blitt gjort og rekkefølgen for igangsettelse. Denne vil som kommentert i kapittel 2.4 i virkeligheten vurderes opp mot de økonomiske ressurser nettselskapet sitter på og hvilke økonomiske forpliktelser de har ovenfor eiere i forhold til kortsiktig og langsiktig avkastning. ROS får inn disse perspektivene og knytter analysen til virkelighetens verden.

Sårbarhetsindikatoren kan relativt til ROS-analysen vektlegge tiltak som øker forsyningssikkerheten for sluttbrukere men som er dyre å gjennomføre. ROS analysen prioriterer ut fra ”teoretisk” samfunnsøkonomisk kostnad. Med det menes at det tar hensyn til alle (i den grad dette er mulig) konsekvenser som påløper samfunnet. Sårbarhetsindikatoren fokuserer på sin side på utvalgte konsekvenser (nedsatt funksjonsdyktighet i samfunnet representert gjennom økonomiske mål og skjønsmessige vurderinger av liv og helse). Dette er i tråd med sårbarhetsbegrepet brukt i denne oppgaven. Konsekvensene det tas hensyn til i sårbarhetsindikatoren er det direkte resultatet av manglende forsyningssikkerhet. Resterende konsekvenser kan i større grad manipuleres i og med at de kan spres utover (f.eks redusert eierutbytte og påslag i nettleie for alle kunder) slik at momentan effekten blir mindre. ROS analyse tar dermed utgangspunkt i samfunnsøkonomiske betraktninger uten tanke på fordelingshensyn, mens sårbarhetsindikatoren fokuserer på forsyningssikkerhet uavhengig av kostnadene dette kan påføre nettselskapet. Det er ikke utenkelig at et kompromiss mellom disse to

---

<sup>10</sup> KILE pr kunde pr time og utetid for maksimal effekt

filosofiene gir et godt bilde av samfunnets totale sårbarhet og at et slikt kompromiss kan være et fornuftig utgangspunkt for en handlingsplan.

En mulig svakhet ved en slik sårbarhetsvurdering er at den utelukkende tar utgangspunkt i nettorienterte tiltak. Dette til tross for at det tidligere i oppgaven ble klart at kundeorienterte tiltak kan være minst like effektive i forhold til værrelaterte hendelser, og da spesielt langvarige avbrudd som følge av dette. For aktører i kraftbransjen er det imidlertid slike nettorienterte tiltak som normalt er tilgjengelige.

Fullført ROS-analyse gir ingen direkte indikasjon på hva som skaper konsekvensen, og dermed hvordan og i hvilken grad den kan håndteres. Dette kan dekke over trender som urimelig lange avbruddstider (som krever gjennomgang av rutiner) eller som i dette tilfellet konstante og høye avbruddskostnader (som kan initiere utredning av oppgradering eller nye linjer). I så måte er sårbarhetsindikatoren et nyttig tillegg.

Et annet moment ved tradisjonell ROS-analyser er at den tar utgangspunkt i forskrift, og er dermed en garanti for at denne blir oppfylt. En slik fremstilling viser dessuten at det er knyttet en indirekte risiko til hendelser på reservelinjen og minner om at en ikke må falle for fristelsen til å nedprioritere vedlikehold og reparasjoner på dette strekket.

ROS analysen gir et i utgangspunktet ordentlig og oversiktlig resultat. Men det er ikke nødvendigvis enklere å få informasjon ut av det av den grunn. Kategoribasert konsekvensvurdering gjør det også lettere å få inn momenter som liv og helse. Det kan imidlertid som i kapittel 2.4 stilles spørsmål ved om dette gir en bra representasjon av faktisk sårbarhet i forhold til disse momentene.

Et viktig bidrag med sårbarhetsindikatoren er at det gir et klart bilde av hvilke tiltak som er reelt sårbarhetsreducerende og hvilke av disse igjen som er mest sårbarhetsreducerende. Ved hjelp av ROS-analyse kan en forsikre seg om at tiltak som velges er økonomisk forsvarlige fra et samfunnsøkonomisk ståsted. Til sammen synes de å gi et dekkende og realistisk bilde av sårbarheten i det undersøkte området. Det

konkluderes dermed i denne oppgaven med at sårbarhetsindikatoren er et nyttig tillegg til ROS-analysen, merarbeidet med dette ikke er uoverstigelig. Denne sammensatte metoden gir et bedre bilde av sårbarhet og anbefales dermed i videre sårbarhetsanalyser.

Denne casen var svært enkel slik at resultatet lettere skulle kunne evalueres. Nyttien ved en slik metode vil imidlertid øke med økende kompleksitet ettersom sårbarhetsvurderinger blir mindre opplagte.

## 6 Potensial for sårbarhetsanalyse

Utgangspunktet for sårbarhetsanalyser i kraftnettet er en gjennomgang av dette systemet og uønskede situasjoner som kan oppstå. En slik gjennomgang kan i seg selv være nyttig fordi det gir bedre oversikt og økt innsikt i systemet en er ansvarlig for. Den kan også gi en nyttig pekepinn på hva en bør være mest oppmerksom på, hvilke nettdeler det er viktigst å holde funksjonsdyktige og hvordan ressurser bør prioriteres.

Bare det å ha oversikt over hvilke hendelser som kan oppstå selv om de ikke nødvendigvis har inntruffet ennå er viktig fra et beredskapssyn. En god sårbarhetsanalyse kan og bør være en forsikring mot å oppleve hendelser en ikke er forberedt på, og som en ikke har forutsetninger for å håndtere. En slik analyse gir mulighet til å kontrollere at en sitter på de rutiner, kunnskaper og ressurser som er nødvendig.

Utviklingstrekk som reduksjon av lokal kunnskap, færre årsverk og høy gjennomsnittsalder (i den forstand at erfaringsbasert kunnskap forsvinner når store andeler arbeidere går av med pensjon samtidig) kan være grunnlag for bekymring. Gode sårbarhetsanalyser kan til en viss grad motvirke dette ved at metodisk gjennomgang av nettet oppveier erfaring og ved at analysene brukes til å nedtegne og formalisere lokal kunnskap og driftsbasert erfaring. Dette letter overføring og spredning av kunnskap.

Samfunnet er i stadig større grad avhengig av en sikker kraftforsyning for å opprettholde sine funksjoner, og det stilles også i stadig større krav til en slik stabil forsyning. Fokus rettes mot konsekvenser av avbrudd – hvilke kostnader det har, hvilke ulemper og også farer det medfører og hvordan det oppleves. I et slikt perspektiv kan det være på sin plass med en evaluering av det samfunnsøkonomiske idealet.

Definisjonen på sårbarhet i denne oppgaven er i så måte et skritt i denne retning, ettersom det fokuseres på nedsatt funksjonsdyktighet i samfunnet fremfor totale kostnader ved en hendelse. Fravær av slik funksjonsdyktighet oppleves som svært sårbart mens fordelte

kostnader i ettertid (for eksempel økt nettleie for alle kunder knyttet til et nettselskap) blir en mer prinsipiell diskusjon. Sårbarhetsanalyse slik den presenteres i denne oppgaven står sentralt i å skyve fokus fra samfunnsøkonomisk til samfunnsrasjonelt. Ved å vekte disse hensynene mot hverandre (noe den kombinerte metoden åpner for), har sårbarhetsanalyse potensial til å vise optimal forsyningssikkerhet.

Som en oppsummering kan en si at sårbarhetsanalyser er et nyttig redskap som gir forståelse for hva som kan komme og hva en må være forberedt på. En godt utført sårbarhetsanalyse vil være en forsikring på at en står rustet til å møte det som kan oppstå, og gjør at en lettere kan iverksette riktige og nødvendige forebyggende tiltak. Videre er sårbarhetsanalyser en metode for overføring av kunnskap, metode for å formalisere og nedtegne kunnskap som kanskje ellers hadde forsvunnet, og det forenkler spredning av kunnskap til et større publikum enn det som ellers hadde vært tilfelle. Sist, men ikke minst gir sårbarhetsanalyse et bilde av samfunnets forsyningssikkerhet. Sårbarhetsanalyse (og da spesielt en utvidet analyse i forhold til den forskriftsmessige) gir et bilde av hvordan hendelser oppleves ute i samfunnet.

### **Videre arbeid**

Sårbarhetsanalyser slik begrepet brukes i denne oppgaven er et relativt nytt fenomen, og det er naturlig nok en del som gjenstår i arbeidet med å utvikle og etablere slike metoder.

Sårbarhet gir seg utslag på mange måter, og selv om en har mange stort sett gode indikatorer er det veldig vanskelig å finne noen som dekker alle sidene ved sårbarhet i kraftnettet og de veldig forskjellige årsakene og hendelsene som ligger bak.

Sårbarhetsindikatoren presentert i denne oppgaven er et forslag i så måte. Det er viktig å fortsette arbeidet med å finne gode indikatorer og gode måter å fremstille sårbarhet på.

Videre kan det være ønskelig å få etablert en standard for sårbarhetsvurdering. Dette øker nytten av det som blir gjort ettersom flere kan benytte seg av datagrunnlaget som blir samlet, og det blir lettere å utveksle informasjon og erfaring. Det gjelder rett og slett å snakke samme språk.

På et mer praktisk nivå er et poeng som har kommet frem i denne oppgaven at sårbarhet, og kanskje spesielt klimarelatert sårbarhet, kan reduseres ved kundeorienterte tiltak. Utføring av og kunnskap om innholdet i sårbarhetsvurderinger er imidlertid ofte begrenset til aktører i kraftbransjen. Et poeng her er å formidle disse analysene til samfunnet på en bedre måte slik at folk flest kan delta i prosessen og eventuelt velge å iverksette tiltak på egenhånd.



## 7 Konklusjon

Denne oppgaven har tatt for seg sårbarhet i kraftnettet, med spesiell fokus på sårbarhet i regional- og distribusjonsnett forårsaket av klimapåkjenninger i en norsk sammenheng. En har forsøkt å finne svar på fire grunnleggende spørsmål;

- Hva innebærer sårbarhet i kraftnettet, og hvordan kan det defineres på en hensiktsmessig måte?
- Hvordan registreres og evalueres sårbarhet i kraftnettet, og finnes det bedre måter å gjøre dette på?
- Hva har klimapåkjenninger å si for sårbarheten i kraftnettet, og hvordan kan klimarelatert sårbarhet evalueres?
- Hva er utbyttet av sårbarhetsanalyser, og hvilket potensial har de?

Når det gjelder sårbarhet i kraftnettet har en sett at denne sårbarheten overføres til samfunnet og er knyttet til forsyningssikkerhet. Sårbarhet i kraftnettet defineres dermed *som en nedsatt funksjonsevne i dette systemet som forplanter seg til en nedsatt funksjonsdyktighet i samfunnet generelt.*

Med utgangspunkt i offentlige retningslinjer og studier har en sett på hvordan sårbarhet i kraftnettet registreres og evalueres. Det stilles klare krav om at ansvarlige parter skal registrere hendelser i nettet og sikre at en akseptabel forsyningssikkerhet blir opprettholdt blant annet gjennom å gjennomføre ROS analyser. Ut over dette finnes ingen etablert metode for sårbarhetsvurderinger, men ikke-levert-energi, utkoblet effekt og avbruddstid er vanlige mål. Alle disse er for så vidt gode parametere, men kan i enkelte tilfeller gi et noe misvisende resultat. I oppgaven utvikles en sårbarhetsindikator som klassifiserer avbrudd ut fra parametere gitt av det rammede området. Utetid for karakteristisk effekt forteller hvor hardt området er rammet, og gjennomsnittlig KILE pr kunde pr time er et mål på utkoblet lasttype og dermed grad av samfunnsmessig funksjonsdyktighet. Hensikten er å kunne sammenligne ulike hendelser i ulike områder på en hensiktsmessig

måte, og å fokusere på faktisk reduksjon i samfunnets funksjonsdyktighet ved en hendelse fremfor totale kostnader.

En forskriftsmessig ROS analyse vurderer hendelser ut fra totale kostnader. Det argumenteres i denne oppgaven for at ikke alle kostnader forårsaket av en hendelse resulterer i nedsatt funksjonsdyktighet i samfunnet. Når det gjelder bedre måter å registrere og evaluere sårbarhet i kraftnettet på anbefales dermed et kompromiss mellom en analyse av totale kostnader og en analyse med utgangspunkt i nedsatt funksjonsdyktighet i samfunnet uttrykt ved sluttbrukerkonsekvenser. Det konkluderes med at sårbarhet bør vurderes på grunnlag både av ROS analyse som beskrevet i forskrift og sårbarhetsindikatoren presentert i denne oppgaven. Dette resultatet vil være samfunnsøkonomisk akseptabelt og samfunnsmessig rasjonelt i den forstand at tiltak vil være reelt sårbarhetsreducerende.

Klimapåkjenninger er sentrale i forhold til sårbarhet i kraftnettet fordi de står for en betydelig andel avbrudd og ILE samtidig som en ikke kan kontrollere været. For analyse av nett anbefales inndeling i seksjoner med utgangspunkt i sentrale parametere som linjetype og omgivelser (skog, kyststrøk, vidde osv), og at hver seksjon behandles som en enhet. Med utgangspunkt i utfallsrommet for klimarelaterte hendelser etablert i denne oppgaven kan en plukke ut de hendelsene som er aktuelle i hver seksjon basert på seksjonens karakteristikk. For dette spesifikke utfallsrommet foretas den kombinerte analyse anbefalt i denne oppgaven.

Slike sårbarhetsanalyser gir helt klart et stort utbytte i forhold til å bedre forståelsen av nettet og vise hvilke eventualiteter en må være forberedt på. Det er nyttig ikke bare for bestemmelse av sårbarhet, men viser også hvilke tiltak som i størst grad reduserer sårbarhet og hvilke beredskapstiltak som bør være tilgjengelig dersom ulykken først er ute. De kan være en kontroll på at en har nødvendig kunnskap, rutiner og ressurser. Sårbarhetsanalyse kan dessuten brukes til effektiv overføring av kunnskap og erfaring ,og kan til en viss grad veie opp for redusert lokal kunnskap.

En del gjenstår i forhold til å finne gode indikatorer på sårbarhet og hvordan disse skal brukes. Synspunktet i denne oppgaven er likevel at dette er en fruktbar tankegang, og at det absolutt er verdt å gå videre med dette. Ikke minst er det mye å hente i det utvidede perspektivet lagt til grunn i denne oppgaven.

## Referanseliste

- [1] TR A6451; Analyser av feil og avbrudd i kraftnettet 1989-2005; Kjølle, Mogstad & Samdal; SINTEF Energiforskning AS; desember 2006
- [2] EFI TR A4247; Beslutningsteori i forbindelse med elkraftsystemet og ekstreme værpåkjenninger. Strukturering av problemstillinger og resultat av litteraturstudier; Kjell Sand; Sintef; August 1995
- [3] TR A6223; Sårbarhet i kraftnettet – en forstudie; Kjølle, Uhlen, Rolfseng & Stene; SINTEF; februar 2006
- [4] TR A5968; Vulnerability of the Nordic Power System. Executive summary. Report to the Nordic Council of Ministers; Doorman, Kjølle, Uhlen, Huse & Flatabø; SINTEF; mai 2004
- [5] Forskrift om leveringskvalitet i kraftsystemet; 2004.11.30 nr 1557; finnes på [www.nve.no](http://www.nve.no)
- [6] Forskrift om systemansvaret i kraftsystemet; 2002.05.07 nr 0448; finnes på [www.nve.no](http://www.nve.no)
- [7] Definisjoner knyttet til feil og avbrudd i det elektriske kraftsystemet, versjon 2, 2001; Referansegruppe feil og avbrudd; finnes på [www.nve.no](http://www.nve.no)
- [8] Forskrift om beredskap i kraftforsyningen; 2002.12.16 nr 1606; finnes på [www.nve.no](http://www.nve.no)
- [9] Forskrift om økonomisk og teknisk rapportering, inntektsramme for nettvirksomheten og tariffer; 1999.03.11 nr 0302 finnes på [www.nve.no](http://www.nve.no)
- [10] Kompendium i TET01 Leveringskvalitet og avbruddskostnader ved Arne T Holen; utgave høsten 2006
- [11] Energifakta; EBL; [www.energifakta.no](http://www.energifakta.no) [05.05.07]
- [12] EFI TR A4341; Strategisk Instituttprogram ved EFI 1994-1996: Elkraftsystemet og ekstreme værpåkjenninger – Samfunnsmessige konsekvenser av omfattende strømbrudd; Jordanger, Aurud, Dahlslett, Heggset, Hem, Verlo & Mogstad; oktober 1996

[13] Fylkesmannen i Nordland;

[http://www.fylkesmannen.no/fmt\\_hoved.asp?tgid=2496&gid=2527&amid=1372096](http://www.fylkesmannen.no/fmt_hoved.asp?tgid=2496&gid=2527&amid=1372096)

[01.06.07]

[14] NRK distriktsnyheter for Nordland; <http://www.nrk.no/nyheter/distrikt/nordland>

[01.06.07]

[15] Brev fra NVE til Nord-Salten Kraftlag datert 8.mai 2007

[16] Erfarenheter av krishandteringsarbeidet etter Gudrun; Beredkapsstaben; 25. april 2005

[17] Stormen Gudrun – Konsekvenser for netbolag och samhelle; Statens Energimyndighet; ER 16:2005

[18] Elkraftsystemet og ekstreme værpåkjenninger. Leveringskvalitet av elektrisiteten til Kristiansund; EFI TR A4553, mai 1997, SINTEF

[19] Svensk Meteorologisk Institutt, SMHI. [www.smhi.se](http://www.smhi.se) [19.01.07]

[20] EFI TR A4464; Klimadata og klassifisering; Rolfseng, Pleym, Alstad, Brede, Huse, Gjørde & Refsnæs; SINTEF; april 1997

[21] Inspection techniques for detecting defects on overhead transmission lines; working group 13 management of existing overhead transmission lines; study committee 22; Cigre; May 2000

[22] Statnett ved Bengt Øverli og Per Ådne Bergfjord; email 18.05.07

[23] IPCC; Intergovernmental Panel on Climate Change, [www.ipcc.ch](http://www.ipcc.ch) [05.04.07]

[24] IPCC AR4, Working Group 1 Report “The Physical Science Basis” tilgjengelig på [www.ipcc.ch](http://www.ipcc.ch)

[25] RegClim; ”Norges klima om 100 år. Usikkerheter og risiko”; [www.regclim.met.no](http://www.regclim.met.no)

[26] RegClim; ”Mer variabelt vær om 50 år. Mer viten om usikkerheten”

[www.regclim.met.no](http://www.regclim.met.no)

[27] Ekstreme vær-situasjoner – hva kan vi forvente og hva er de største risikomomentene;  
Power-point presentasjon av meteorologisk konsulent kraftledninger Svein M. Fikke

[28] Svein M. Fikke; email 18.06.07

---

## **VEDLEGG**

<b>Vedlegg 1</b>	<b>ROS analyse, veiledning til norm</b>
<b>Vedlegg 2</b>	<b>Utfallsrom, kommentarer fra Statnett</b>
<b>Vedlegg 3</b>	<b>Linjetraseer, case</b>
<b>Vedlegg 4</b>	<b>Økonomiske konsekvenser, case</b>
<b>Vedlegg 5</b>	<b>ROS analyse, case</b>
<b>Vedlegg 6</b>	<b>Sårbarhetsindikator, case</b>

---

## Vedlegg 1

# ROS analyse

Virksomhetene omfattet av Kraftforsyningens beredskapsorganisasjon (KBO) plikter i følge "Forskrift om beredskap i kraftforsyningen" å foreta og oppdatere såkalte risiko- og sårbarhetsanalyser. I det følgende beskrives gangen i en slik analyse med utgangspunkt i veiledningen som ledsager forskriften.

ROS brukes i veiledningen om en enkel metode for risiko- og sårbarhetsanalyser. For mer kompliserte prosesser anbefales andre metoder som for eksempel HAZOP. Det kan være greit å ha denne "begrensningen" i minne.

Hovedmålsetningen med en ROS analyse er å identifisere svakheter i kraftforsyningen slik at disse kan forebygges. I stor grad handler det om en bevisstgjøring av de hendelser som kan oppstå, og hvordan en best kan håndtere disse i forkant, under og etter selve hendelsen. En skal også evaluere sannsynligheten av disse hendelsene som et ledd i å foreta beslutninger om hva som bør gjøres. Analysens fem faser utarbeider samtidig dokumentasjon som gjør det lettere å dra konklusjoner i etterkant av arbeidet.

For en helhetlig analyse anbefaler veiledningen at fagpersoner fra ulike felt involveres i prosjektgruppen; vassdragsteknisk ansvarlig, beredskapskoordinator, HMS-leder, Driftsleder samt Nett/Produksjonsleder fra virksomheten. Det kan også være aktuelt å trekke inn eksterne ressurser. Her nevnes spesielt politi, forsvar, fylkesmann/kommune og store kunder. Dette kan være en fordel med tanke på koordinering dersom en reell krise skulle oppstå.



Analysen kan som sagt deles inn i fem faser:

1. Kartlegge uønskede hendelser
2. Beskrive årsaker og fastsette sannsynlighet
3. Beskrive konsekvenser
4. Forme risikomatrise
5. Foreslå mottiltak

### **1. Kartlegging av uønskede hendelser**

I første omgang gjelder det å finne frem til alle negative hendelser som kan tenkes å oppstå i kraftsystemet, for så å luke ut de som realistisk sett må antas å være uaktuelle. Slike analyser tar ofte utgangspunkt i de tre faktorene menneske, miljø og økonomi. For kraftbransjen kan det imidlertid være aktuelt med en noe mer detaljert inndeling;

- Liv og helse
- Miljø
- Økonomiske verdier
- Drift, produksjon og tjenester
- Økonomiske tap
- Renommè

### **2. Beskrivelse av årsaker og fastsettelse av sannsynlighet**

Neste skritt er å kartlegge de årsakene som kan føre til at hendelsene listet opp i punkt en kan oppstå. I følge veiledningene kan en hensiktsmessig oppdeling her være

- Teknisk svikt
- Menneskelig (evt organisatorisk) svikt
- Ytre påvirkninger

- Kombinasjoner av disse

En slik kartlegging bør også ta utgangspunkt i de forebyggende tiltak som allerede finnes mot de aktuelle hendelsene.

Med utgangspunkt i årsaksbeskrivelsene skal en deretter avgjøre hvor ofte de ulike hendelsene må forventes å inntreffe. Denne sannsynligheten kan forankres i tilgjengelig statistikk, erfaring og systemets tilstand.

Veiledningen foreslår følgende kategorisering av sannsynlighet:

Kategori	Nivå	Beskrivelse av sannsynlighet (frekvens)
Meget sannsynlig	4	1 gang pr. år eller oftere
Sannsynlig	3	1 gang pr. 10 år eller oftere
Mindre sannsynlig	2	1 gang pr. 50 år eller oftere
Lite sannsynlig	1	Sjeldnere enn 1 gang pr. 50 år

### **3. Beskrive konsekvenser**

Her gis følgende forslag:

Begrep	Nivå	Konsekvens		
		Mennesker	Miljø	Økonomiske verdier
Ufarlig	1	Ingen personskader	Ingen miljøskader	Skader opp til 10 000 kr
En viss fare	2	Få og små personskader	Mindre miljøskader	Skader opp til 100 000
Farlig	3	Få men alvorlige personskader	Omfattende skader på miljøet	Skader opp til 1 mill
Kritisk	4	1 død Opp til 5 alvorlige skadde Opp til 100 evakuerte	Alvorlige og farlige skader på miljøet	Skader opp til 10 mill
Katastrofal	5	Over 1 død Over 5 alvorlige skadde Over 100 evakuerte	Svært alvorlige og langvarige skader på miljøet	Skader over 10 mill

Ut fra en nærmere presisering av hva som ligger i de ulike begrepene, kan de uønskede hendelsene dermed rangeres etter forventet konsekvens. Dersom konsekvensen for de ulike faktorene (menneske, miljø og økonomi) vurderes ulikt, anbefaler veiledningen å gå videre med den høyeste verdien.

#### **4. Risikomatrixe**

De resulterende sannsynlighetene og konsekvensene settes deretter sammen i en risikomatrixe ut fra den velkjente;

$$[\text{Risiko}] = [\text{Sannsynlighet}] * [\text{Konsekvens}]$$

Sannsynlighet	Konsekvens for objekt X område Y				
	Ufarlig 1	En viss fare 2	Farlig 3	Kritisk 4	Katastrofalt 5
Meget sannsynlig 4	<b>4</b>	<b>8</b>	<b>12</b>	<b>16</b>	<b>20</b>
Sannsynlig 3	<b>3</b>	<b>6</b>	<b>9</b>	<b>12</b>	<b>15</b>
Mindre sannsynlig 2	<b>2</b>	<b>4</b>	<b>6</b>	<b>8</b>	<b>10</b>
Lite sannsynlig 1	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>

Til sist må resultatene i risikomatrixen vurderes opp mot gitte akseptkriterier. Igjen kommer veiledningen med forslag:

- 1 – 2            Lav risiko        Krever ingen tiltak
- 3 – 9            Middels risiko Krever kritisk vurdering om tiltak skal settes i verk, evt mer detaljerte analyser foretas
- 10 – 20        Høy risiko       Dette er uakseptabel risiko, og tiltak må iverksettes.

#### **5. Foreslå mottiltak**

Basert på risikomatrixene kan en lage handlingsplaner for hvordan risiko på best mulig kan håndteres gjennom forebyggende og skadebegrensende tiltak. Til syvende og siste er

det selskapets ledelse som må vurdere hvordan en skal forholde seg til risiko på en akseptabel måte.

---

## Vedlegg 2

### Utfallsrom, kommentarer Statnett

Kommentarer fra Statnett er ført inn i kursiv

Medvirkende årsak (vær)	Bakenforliggende årsak (teknisk tilstand)	Utløsende årsak	Resultat (feil situasjon)
Direkte lynnedslag til luftledning <sup>1</sup>	Vanskelige jordingsforhold  <i>Mastejordingene måles regelmessig og skal være ok. Topplinjene (2 stk) skal normalt ta unna ca 80% av lynene slik at faselinjen ikke blir påvirket</i>	Jordfeil	Bryterfall/utkobling med eller uten gjeninnkobling  <i>I spolejordet nett (normalt 132kV og nedover) vil ikke en fase jordslutning medføre bryterfall. Ved flerfasefeil vil linja bli utkoblet. Men kan bli innkoblet med kontrollert gjeninnkobling (automatisk)</i>
--		Kortslutning	Bryterfall/utkobling med eller uten gjeninnkobling
--		Jordfeil og kortslutning	Bryterfall/utkobling med eller uten gjeninnkobling

---

<sup>1</sup> Kan også oppnås i sentralnettet ved overslag fra jordline ved vanskelige jordingsforhold eller på luftledninger distribusjonsnettet som følge av indusert overspenning fra lynnedslag i nærheten.

--			Overspenning som resulterer i stor 50 Hz følgestrøm som skader elektronikk og datautstyr og brannstiftelse (først og fremst i distribusjonsnett)
--	Ikke-optimal dimensjonering	Ødelagt bryter <i>Havari på strøm eller spennings-transformator er mer vanlig. Disse måler strøm og spenninger på linjer og transformatorer</i>	Forsyningsbrudd
--	Ikke-optimalt vern <i>kan være havarerte/ikke-fungerende overspenningsavledere</i>	Ødelagt transformator	Forsyningsbrudd
--		Brudd i ytre ledertråder <i>Har ikke hørt om dette</i>	Redusert mekanisk styrke
Sjøsprøyt / industriforurensning / Forurenset snø/isbelegg		Overslag til jord fra linje/isolator <i>Ikke uvanlig med saltbelegg på isolatorer som fører til jordslutning. Saltbelegget på aktuell isolator blir svidd av og ny feil oppstår ev. på annen saltbelagt isolator</i>	Utkobling med eller uten gjeninnkobling
--		(Dobbel) jordslutning <i>Doble jordfeil</i> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Inntreffer som regel etter stående jordfeil</i></li> <li>• <i>Doble jordfeil</i></li> </ul>	Bryterfall/utkobling med eller uten gjeninnkobling

		<p><i>er en kortslutningstilstand (frakobling)</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li><i>Doble jordfeil detekteres og frakobles av distansevern</i></li> </ul> <p><i>Dette gjelder spolejordet nett og kan oppstå ved alle typer vær</i></p>	
Vind	Manglende avstandsholdere	<p>Fasesammensalg</p> <p><i>Looper kan løsne og slå mot mast eller annen fase</i></p>	Bryterfall/utkobling med eller uten gjeninnkobling
--		Brudd i en eller flere master	Fysisk forsyningsbrudd
--		<p>Linjer ryker som en direkte følge av vindstyrke</p> <p><i>Ikke hørt om dette</i></p>	Fysisk forsyningsbrudd
--		Trær velter over linjer	Fysisk forsyningsbrudd
--	Manglende vedlikehold av traseer	Trær kommer i kontakt med linjer	Utkobling med eller uten gjeninnkobling
--		<p>Avslitte aluminiumstråder</p> <p><i>Linja består av aluminium som er spunnet rundt en stålkjerne, aluminiumen kalles kordeller og det kan av og til være brudd eller skade på disse. Ved høy strøm fører dette til varmgang og skade. Det har også vært problemer i linjeskjøter der slitasje har ført til fasebrudd</i></p>	Fysisk forsyningsbrudd
--		Utmattelse eller skade	Nedsatt mekanisk

		i ledertråder	styrke
--		Slitasje på fester/ledningsoppheng og avstandsholdere	Nedsatt mekanisk styrke
--		Manglende eller løse bolter og skruer	Nedsatt mekanisk styrke
--		Ødelagte konstruksjonsdeler	Nedsatt mekanisk styrke
Is/snø		Konstruksjoner kollapser  <i>Den mest vanlige feilen ved is/snø er at snøen/isen faller av faselinjer eller topplinjer og disse kommer for nær hverandre eller mast. En annen er snøskred eller fonner som går og medfører kortslutninger og jordfeil kun ved lufttrykk. Selvfølgelig har også snøskred tatt master</i>	Fysisk forsyningsbrudd
--		Linjer ryker	Fysisk forsyningsbrudd
Regn		Oversvømmelser	
--		Jord- eller leirras  <i>Det er jo ofte dårlige kombinasjoner av vær som skaper problemer. Og været i seg selv gjør at det tar lang tid å feilsøke/reparere. En annen ting er følgefeil der ett utfall på en viktig komponent medfører problemer og utfall på en annen viktig komponent. Dette kan forstyrre strømforsyningen over større områder</i>	Fysisk forsyningsbrudd



## Vedlegg 3

### Linjetraseer, case

#### Lederdimensjonering

For enkelhetsskyld antar en at en økonomisk optimalisering overholder tekniske kriterier som akseptabelt spenningsfall, driftstemperatur og kortslutningsstrømmer.

Dermed er ledere valg ut fra følgende forhold som tar hensyn til investeringskostnader, tapkostnader, avbruddskostnader og drift- og vedlikeholdskostnader (ligningen er hentet fra faget TET11 Netteffektivisering):

$$A_{opt} [\text{mm}^2] = P/U_L \cos\varphi \cdot \sqrt{(\rho k_{pgj} \lambda_{r,N} 10^{-3} / k_{tv})}$$

Der

	Seksjon 1	Seksjon 2	Seksjon 3	Seksjon 4	Seksjon 5	Seksjon 6
<b>U [kV]</b>	22	66	66	22	66	66
<b>P [kW]</b>	6 000	6 000	6 000	12 000	12 000	12 000

Variabel	Verdi	Kommentar
cos φ	0,98	
ρ	18,2	cu-ekvivalent
k <sub>pgj</sub>	1200	Hentet fra faget TET11 Netteffektivisering
λ <sub>r,N</sub>	13,76	r=6, N=30
k <sub>tv</sub>	1000	Hentet fra faget TET11 Netteffektivisering

Dette gir følgende resultat:

	Seksjon 1	Seksjon 2	Seksjon 3	Seksjon 4	Seksjon 5	Seksjon 6
<b>A<sub>opt</sub></b>	152,6	50,9	50,9	305,1	101,7	101,7
<b>Valgt tverrsnitt</b>	150	50	50	2 x 150	100	100

**Nærmere beskrivelse av linjetrasseene:**

Trasene kan grovt sett deles inn i seks ulike seksjoner:

1. 22 kV, 1927-linje går et stykke langs en bilvei i et dalføre
2. 66 kV, 1927-linje går opp en åsside med løvskog
3. 66 kV, 1927-linje går over et åpent, relativt høytliggende fjellområde
4. 22 kV, 1976-linje går et stykke langs kysten
5. 66 kV, 1976-linje går gjennom en barskog
6. 66 kV, 1976-linje går langs E6

**Seksjon 1**

Denne delen av linjen fra 1927 går i et dalføre langs en bilvei. Dette linjestrekket ligger relativt god beskyttet for vær og vind, og det har vært få problemer knyttet til drift.

Videre er linjen lett tilgjengelig for inspeksjoner, vedlikehold og reparasjoner. På grunn av lav feilfrekvens er det ikke gjort større reinvesteringer i på dette strekket. Utskiftninger og korreksjon av feil har blitt gjort etter hvert som behov har oppstått. De fleste feil som kan knyttes til klima er et resultat av påkjenninger og slitasje over tid – ikke av ekstreme enkelthendelser.

Værrelaterte feil for seksjon 1:

Vind	Avslitte aluminiumstråder gjør at linje ryker	Fysisk forsyningsbrudd
Vind	Utmattelse eller skade i ledertråder	Nedsatt mekanisk styrke
Vind	Slitasje på fester/ledningsoppheng og avstandsholdere	Nedsatt mekanisk styrke
Vind	Manglende eller løse bolter og skruer	Nedsatt mekanisk styrke

Andre karakteristikk:

Ledningslengde	16 km
Gjennomsnittlig tid til feilsted	45 min

**Seksjon 2**

Etter å ha fulgt dalføret transformeres 1927-linjen opp til 66 kV og går opp dalsiden til et åpent, høyereliggende fjellområde. Denne delen av traseen ble oppgradert i 1986.

Linjestrekket går gjennom løvskog, og det har vært en del feilsituasjoner på dette strekket som følge av vind og trær. Dette til tross for at det foretas årlige befaringer av linjestrekket. Dette er mulig ettersom det dreier seg om et relativt lite område som er lett tilgjengelig. Det relativt grei fremkommelighet i linjetraseen, men det kan være problematisk å få fraktet større utstyr fra bilveien og opp i lia.

Værrelaterte feil for seksjon 2:

Vind	Trær velter over linjer	Fysisk forsyningsbrudd
Vind	Trær velter over stolpe	Fysisk forsyningsbrudd
Vind	Trær kommer i kontakt med linjer	Utkobling med eller uten gjeninnkobling

Andre karakteristikk:

Ledningslengde	3 km
Gjennomsnittlig tid til feilsted	1,5 timer

### Seksjon 3

Dette 66 kV strekket av 1927-linjen går over et åpent, høyereliggende fjellområde. I 1970 ble de gamle trestolpene på dette strekket erstattet med master. Fremkommelighet om vinteren er ved hjelp av snøscooter, mens en om sommeren bruker en gammel anleggsvei.

Værrelaterte feil for seksjon 3:

Direkte lynnedslag til luftledning <sup>2</sup>	Jordfeil	Bryterfall/utkobling med eller uten gjeninnkobling
--	Kortslutning	Bryterfall/utkobling med eller uten gjeninnkobling
--	Ødelagt bryter	Forsyningsbrudd
--	Ødelagt transformator	Forsyningsbrudd
Vind	Fasesammensalg	Bryterfall/utkobling med eller uten gjeninnkobling
--	Brudd i mast	Fysisk forsyningsbrudd
	Ødeleggelse over et	Fysisk forsyningsbrudd

<sup>2</sup> Kan også oppnås i sentralnettet ved overslag fra jordline ved vanskelige jordingsforhold eller på luftledninger distribusjonsnettet som følge av indusert overspenning fra lynnedslag i nærheten.

	større område	
--	Ødelagte konstruksjonsdeler	Nedsatt mekanisk styrke
Is/snø	Konstruksjoner kollapser	Fysisk forsyningsbrudd
	Linjer ryker	Fysisk forsyningsbrudd
--	Kortslutning	Bryterfall/utkobling med eller uten gjeninnkobling

Ledningslengde	28 km
Gjennomsnittlig tid til feilsted	4 timer

#### Seksjon 4

Seksjon 4 er 22 kV strekket på 1976-linjen som går ut av byen. Dette linjesegmentet går sørover langs strandkanten. Hovedproblemene her har i første rekke vært saltbelegg fra havet. Dette ble tidligere forsterket av industribelegg fra trevarefabrikken, men denne forurensningskilden er nå fjernet som følge av installering av nytt rensesystem.

Fasesammenslag har forekommet i enkelte tilfeller når vinden har stått inn fra havet eller kommet ned dalen. Ved slike tilfeller treffere vinden praktisk talt vinkelrett på linjene.

Værrelaterte feil for seksjon 4:

Sjøsprøyt	Overslag til jord fra linje/isolator	Utkobling med eller uten gjeninnkobling
Sjøsprøyt	(Dobbel) jordslutning	Bryterfall/utkobling
Vind	Fasesammensalg	Bryterfall/utkobling med eller uten gjeninnkobling

Andre karakteristikk:

Ledningslengde	3 km
Gjennomsnittlig tid til feilsted	40 min

#### Seksjon 5

Spenningen transformeres opp til 66 kV før 1976-linjen går gjennom granskogen som i sin tid dannet grunnlaget for trevarefabrikken. Skogen er til dels tett, og fremkommeligheten kan være begrenset med unntak av skogsveier laget i forbindelse med skogvirke. I likhet med seksjon 2 er hovedproblemer i forhold til vær også her knyttet til vind og trær. I tillegg til individuelle hendelser, opplevde en i 1992 store

ødeleggelser på dette linjestrekket under orkanlignende forhold. Under gjenoppbyggingen valgte en å øke bredden i traseen noe.

Værrelaterte feil for seksjon 5:

Vind	Trær velter over linjer	Fysisk forsyningsbrudd
Vind	Trær kommer i kontakt med linjer	Utkobling med eller uten gjeninnkobling
Vind	Trær velter over stolpe	Fysisk forsyningsbrudd
Vind	Stort nedfall av trær	Forsyningsbrudd samt skade på linjer, traseer og konstruksjoner

Andre karakteristikk:

Ledningslengde	18 km
Gjennomsnittlig tid til feilsted	4 timer

### Seksjon 6

Det siste 66 kV strekket av 1976-linjen går langs E6 i et område som er lite utsatt for værpåkjenninger.

Andre karakteristikk:

Ledningslengde	10 km
Gjennomsnittlig tid til feilsted	1 time

---

## Vedlegg 4

### Økonomiske konsekvenser, case

Følgende kostandselementer er vurdert for den økonomiske konsekvensutredningen; avbruddskostander (KILE), materialkostnader (linjer og andre komponenter) og utgifter til arbeidskraft i forbindelse med en feilhendelse. Utetider for KILE og arbeidstimer er basert på karakteristiske tider for de ulike seksjonene oppgitt i vedlegg 3.

#### KILE

Fra beskrivelsen av casen ser en at det kun er avbrudd i seksjonene 4 og 5 som vil gi KILE. Disse kostnadene er vist i tabellen under. Tillegg for dårlig vær er lagt til der årsaken til brudd tilsier dette.

Seksjon	Hendelse	KILE kostnad
Seksjon 4	Saltbelegg fra sjøsprøyt gir overslag fra linje eller isolator til jord med mislykket gjeninnkobling	206 702 NOK
	Saltbelegg fra sjøsprøyt gir (dobbel) jordslutning med mislykket gjeninnkobling	206 702 NOK
	Vind gir fasesammenslag med mislykket gjeninnkobling	206 702 NOK
Seksjon 5	Vind gjør at trær velter over linje	569 922 NOK
	Vind gjør at trær kommer i kontakt med linjer med mislykket innkobling	432 858 NOK
	Vind gjør at trær velter over stolpe	844 050 NOK
	Sterke vinder fører til at trær velter over et stort område	11 672 106 NOK

#### Andre komponenter

Tabellen under viser hendelser der komponenter må byttes ut. Hendelser som bidrar til mekanisk slitasje er foreløpig ikke tatt med. Dette er et spørsmål om hvor mye hensyn en

skal ta til preventivt vedlikehold. I utgangspunktet antas det dermed kun reparasjoner når avbrudd forårsaket av ødelagte komponenter oppstår. Videre antas det at linjer som faller i bakken når stolper/master velter skiftes ut. I Et slikt tilfelle må dermed to linjer byttes ut i tillegg til stolpen/masten. For ”katastrofehendelsene” store ødeleggelser i seksjonene 3 og 5, antas det at linjer over en total strekning på 2 km må byttes ut (20 linjestrekk og 19 stolper/master).

Seksjon	Hendelser	Kostnad
Seksjon 1	Linje ryker pga vindslitasje	41 000
Seksjon 2	Trær velter over linje	35 000
	Trær velter over stolpe	70 500
Seksjon 3	Lynnedslag fører til ødelagt bryter	2 000
	Lynnedslag fører til ødelagt transformator	60 000
	Vind fører til at en mast bryter sammen	73 000
	Vind gir ødeleggelser over et større område	757 000
	Is og snø fører til at en mast velter	73 000
	Is/snø fører til at en linje ryker	35 000
Seksjon 5	Vind gjør at trær velter over linje	40 000
	Vind gjør at trær velter over stolpe	80 500
	Sterke vinder fører til at trær velter over et stort område	809 500

Følgende priser er lagt til grunn:

Komponent	Kostnad
Bryter	2 000
Transformator	60 000
Stolpe	500
Mast	3 000
Linje 22 kV, 100 m FeAl 150	41 000
Linje 66 kV, 100 m FeAl 50	35 000
Linje 66 kV, 100 m FeAl 100	40 000

Det antas at kabler som faller i bakken får skade, slik at en der stolper/master velter bytter 2 spenn med linjer. Fester og ledningsoppheng er ikke tatt med på grunn av den lave kostnadsandelen

### Arbeidsinnsats

Her beregnes hvor mye menneskelige ressurser som benyttes med utgangspunkt i kostnad pr mann pr time. Her er det snakk om ressurser brukt til inspeksjon og eventuelle reparasjoner. Dette vil i realiteten si tilfeller med avbrudd – enten på grunn av ødelagte komponenter eller mislykket gjeninnkobling.

Tabellen under viser hendelser som krever arbeidsinnsats og kostnaden av dette:

Seksjon	Hendelser	Kostnad
---------	-----------	---------

Seksjon 1	Linje ryker pga vindslitasje	3 150
Seksjon 2	Trær i kontakt med linjer med mislykket gjeninnkobling	2 100
	Trær velter over linje	7 350
	Trær velter stolpe	21 000
Seksjon 3	Lynnedslag gir jordfeil med mislykket gjeninnkobling	5 600
	Lynnedslag gir kortslutning med mislykket gjeninnkobling	5 600
	Lynnedslag fører til ødelagt bryter	14 700
	Lynnedslag fører til ødelagt transformator	7 000
	Vind gir fasesammenslag med mislykket gjeninnkobling	5 600
	Vind fører til at en mast bryter sammen	63 000
	Vind gir ødeleggelser over et større område <sup>3</sup>	588 000
	Is og snø fører til at en mast velter	63 000
	Is/snø fører til at en linje ryker	14 700
	Is/snø faller ned og gir kortslutning ved at faser slår sammen	5 600
Seksjon 4	Saltbelegg fra sjøsprøyt gir overslag fra linje eller isolator til jord med mislykket gjeninnkobling	1 400
	Saltbelegg fra sjøsprøyt gir (dobbel) jordslutning med mislykket gjeninnkobling	1 400
	Vind gir fasesammenslag uten gjeninnkobling	1 400
Seksjon 5	Vind gjør at trær velter over linjene	15 750
	Vind gjør at trær kommer i kontakt med linjer med mislykket innkobling	5 600
	Vind gjør av trær velter over stolpe	63 000
	Sterke vinder fører til at trær velter over et stort område <sup>4</sup>	840 000

### Total økonomisk konsekvens

Summen av kostnadspostene blir dermed:

Seksjon	Hendelser	Kostnad
Seksjon 1	Linje ryker pga vindslitasje	44 150
Seksjon 2	Trær i kontakt med linjer med mislykket gjeninnkobling	2 100
	Trær velter over linjer	42 350
	Trær velter stolpe	91 500
Seksjon 3	Lynnedslag gir jordfeil med mislykket gjeninnkobling	5 600
	Lynnedslag gir kortslutning med mislykket gjeninnkobling	5 600
	Lynnedslag fører til ødelagt bryter	16 700
	Lynnedslag fører til ødelagt transformator	67 000

<sup>3</sup> 12 mann jobber/er i beredskap 14 timer i døgnet i omtrent 10 dager

<sup>4</sup> 12 mann jobber/er i beredskap 14 timer i døgnet i omtrent to uker. Forsyning gjenopprettes etter en uke.



	Vind gir fasesammenslag med mislykket gjeninnkobling	5 600
	Vind fører til at en mast bryter sammen	136 000
	Vind gir ødeleggelser over et større område <sup>5</sup>	1 345 000
	Is og snø fører til at en mast velter	136 000
	Is/snø fører til at en linje ryker	49 700
	Is/snø faller ned og gir kortslutning ved at faser slår sammen	5 600
Seksjon 4	Saltbelegg fra sjøsprøyt gir overslag fra linje eller isolator til jord med mislykket gjeninnkobling	208 102
	Saltbelegg fra sjøsprøyt gir (dobbel) jordslutning med mislykket gjeninnkobling	208 102
	Vind gir fasesammenslag uten gjeninnkobling	208 102
Seksjon 5	Vind gjør at trær velter over linjene	625 672
	Vind gjør at trær kommer i kontakt med linjer med mislykket innkobling	438 458
	Vind gjør av trær velter over stolpe	987 550
	Sterke vinder fører til at trær velter over et stort område <sup>6</sup>	13 321 606

## Div

I tillegg til disse hendelsene som får økonomiske og potensielt også andre konsekvenser fører vær en rekke steder til nedsatt mekanisk styrke. Dette øker igjen sjansene for at hendelser som gir reelle konsekvenser oppstår. Dette er også med på å øke sårbarheten i systemet.

Til tross for at relativt få hendelser isolert sett fører til forsyningsbrudd, vil systemet være sårbart om flere hendelser inntreffer samtidig. Sterke vinder over hele området kan føre til store ødeleggelser på begge linjer (selv om dette er lite sannsynlig på grunn av topografien). Lange avbrudd som når en transformator er ute av drift tar bort alternativ forsyningsvei ved avbruddshendelse nummer to. Ved langvarig feil på 1976 linjen vil en dessuten ha redusert forsyning over lengre tid om ikke tilstrekkelig med aggregat osv. anskaffes.

Tidene kan øke kraftig ved dårlig vær – potensiell sårbarhet (til tross for at dette er forsøkt tatt hensyn til i caset).

<sup>5</sup> 12 mann jobber/er i beredskap 14 timer i døgnet i omtrent 10 dager

<sup>6</sup> 12 mann jobber/er i beredskap 14 timer i døgnet i omtrent to uker. Forsyning gjenopprettes etter en uke.

**KILE**

Kategori	Normal andel	Begrenset tilgang	KILE [NOK/kWh]	Full utkobling	Deltvis utkobling
Industri	0,10	0,00	69,90	83880,00	0,00
Handel og tjenester	0,10	0,00	103,30	123960,00	0,00
Treforedling og kraftintensiv	0,30	0,35	13,90	50040,00	29190,00
Offentlig virksomhet	0,05	0,08	13,40	8040,00	6432,00
Jordbruk	0,05	0,07	15,50	9300,00	6510,00
Husholdning	0,40	0,50	8,80	42240,00	26400,00
sum	1,00	1,00		317460,00	68532,00
Last			12000 kW		
Redusert last			6000 kW		

**Seksjon****Hendelser****Helt Deltvis KILE**

Seksjon 4	Saltbelegg fra støsprøyt gir overslag fra linje eller isolator til jord med mistykket gjennomkobling	0,50	0,7	<b>206702</b>
	Saltbelegg fra støsprøyt gir (dobbel) jordslutning med mistykket gjennomkobling	0,50	0,7	<b>206702</b>
	Vind gir fasesammenslag med mistykket gjennomkobling	0,50	0,7	<b>206702</b>
Seksjon 5	Vind gjør at trær velter over linjene	0,50	6	<b>569922</b>
	Vind gjør at trær kommer i kontakt med linjer med mistykket innkobling	0,50	4	<b>432858</b>
	Vind gjør at trær velter over stolpe	0,50	10	<b>844050</b>
	Sterke vinder fører til at trær velter over et stort område	0,50	168	<b>11672106</b>

### Komponenter

Komponent	Kostrnad [NOK]
Transformator	60000
Stolpe	500
Mast	3000
Bryter	2000

100 m linje	22 kV 150mm	66 kV 50mm	66 kV 100mm
	41000	35000	40000

Seksjon	Hendelse	Transformator	Stolpe	Mast	Bryter	Linje	Kostrnad
Seksjon 1	Linje ryker som et resultat av vind	0	0	0	0	1	41000
Seksjon 2	Vind fører til at trær velter over linje	0	0	0	0	1	35000
	Vind fører til at trær velter over stolpe	0	1	0	0	2	70500
Seksjon 3	Lynnedslag fører til ødelagt bryter	0	0	0	1	0	2000
	Lynnedslag fører til ødelagt transformator	1	0	0	0	0	60000
	Vind fører til at en mast bryter sammen	0	0	1	0	2	73000
	Vind gir ødelegelser over et større område	0	0	19	0	20	757000
	Is og snø fører til at en mast velter	0	0	1	0	2	73000
	Is/snø fører til at en linje ryker	0	0	0	0	1	35000
Seksjon 5	Vind gjør at trær velter over linje	0	0	0	0	1	40000
	Vind gjør at trær velter over stolpe	0	1	0	0	2	80500
	Sterke vinder fører til at trær velter over et stort område	0	19	0	0	20	809500

**Arbeidstimer**

Kostnad pr man pr time: 350 NOK

<b>Seksjon</b>	<b>Hendelser</b>	<b>Mann</b>	<b>Timer</b>	<b>Kostnad</b>
Seksjon 1	linje ryker pga vindstillasje	3	3	3150
	Trær i kontakt med linjer med mistykket gjennomkobling	2	3	2100
	Trær veltet over linje	3	7	7350
Seksjon 2	Trær veltet over stolpe	6	10	21000
	Lymnedslag gir jordfeil med mistykket gjennomkobling	2	8	5600
	Lymnedslag gir kortslutning med mistykket gjennomkobling	2	8	5600
Seksjon 3	Lymnedslag fører til ødelagt bryter	3	14	14700
	Lymnedslag fører til ødelagt transformator	1	20	7000
	Vind gir fasesammenlag med mistykket gjennomkobling	2	8	5600
	Vind fører til at en mast bryter sammen	6	30	63000
	Sterke vinder forårsaker ødeleggelse over et større område	12	140	588000
	Is og snø fører til at en mast veltet	6	30	63000
	Is/snø fører til at en linje ryker	3	14	14700
	Is/snø faller ned og gir kortslutning ved at faser slår sammen	2	8	5600
	Saltbelegg fra sjøsprøyt gir overslag fra linje/isolator til jord uten gjennomkobling	2	2	1400
	Saltbelegg fra sjøsprøyt gir (dobbel) jordslutning med mistykket gjennomkobling	2	2	1400
Seksjon 4	Vind gir fasesammenlag med mistykket gjennomkobling	2	2	1400
	Vind gjør at trær veltet over linje	3	15	15750
	Vind gjør at trær kommer i kontakt med linjer med mistykket innkobling	2	8	5600
Seksjon 5	Vind gjør at trær veltet over stolpe	6	30	63000
	Sterke vinder fører til at trær veltet over et stort område	12	200	840000

<b>Totall</b>
---------------

<b>Seksjon</b>	<b>Hendelser</b>	<b>KILE</b>	<b>komponenter</b>	<b>Arbeid</b>	<b>Sum</b>
Seksjon 1	Linje ryker pga vindslitasje	0	41000	3150	44150
Seksjon 2	Trær i kontakt med linjer med mislykket gjennkobling	0	0	2100	2100
	Trær veltet over linje	0	35000	7350	42350
	Trær veltet over stolpe	0	70500	21000	91500
Seksjon 3	Lynnedslag gir jordfeil med mislykket gjennkobling	0	0	5600	5600
	Lynnedslag gir kortslutning med mislykket gjennkobling	0	0	5600	5600
	Lynnedslag fører til ødelagt bryter	0	2000	14700	16700
	Lynnedslag fører til ødelagt transformator	0	60000	7000	67000
	Vind gir fasesammenlag med mislykket gjennkobling	0	0	5600	5600
	Vind fører til at en mast bryter sammen	0	73000	63000	136000
	Sterke vinder gir ødeleggelser over et større område	0	757000	588 000	1345000
	Is og snø fører til at en mast veltet	0	73000	63000	136000
	Is/snø fører til at en linje ryker	0	35000	14700	49700
	Is/snø faller ned og gir kortslutning ved at faser slår sammen	0	0	5600	5600
Seksjon 4	Saltbelegg gir overslag fra linje/isolator til jord uten gjennkobling	206702	0	1400	208102
	Saltbelegg fra sjøsprøyt gir (dobbel) jordslutning uten gjennkobling	206702	0	1400	208102
	Vind gir fasesammenlag med mislykket gjennkobling	206702	0	1400	208102
Seksjon 5	Vind gjør at trær veltet over linje	569922	40000	15750	625672
	Vind gjør at trær kommer i kontakt med linjer med mislykket innkobling	432 858	0	5600	438458
	Vind gjør at trær veltet over stolpe	844050	80500	63000	987550
	Sterke vinder fører til at trær veltet over et stort område	11672106	809500	840000	13321606

## Vedlegg 5

### ROS analyse, case

Denne tabellen viser poengsum for de ulike hendelsene i utfallsrommet:

Seksjon	Hendelse	Kons	Sanns	Risiko
Seksjon 1	Avslitte aluminiumstråder	2	2	4
Seksjon 2	Trær i kontakt med linjer med mislykket gjeninnkobling	1	4	4
	Trær velter over linje	2	3	6
	Trær velter over stolpe	2	3	6
Seksjon 3	Lynnedslag gir jordfeil med mislykket gjeninnkobling	1	4	4
	Lynnedslag gir kortslutning med mislykket gjeninnkobling	1	4	4
	Lynnedslag fører til ødelagt bryter	2	3	6
	Lynnedslag fører til ødelagt transformator	2	1	2
	Vind gir fasesammenslag med mislykket gjeninnkobling	1	4	4
	Vind fører til at en mast bryter sammen	3	2	6
	Sterke vinder gir ødeleggelser over et større område	4	1	4
	Is og snø fører til at en mast velter	3	1	3
	Is/snø fører til at en linje ryker	2	2	4
	Is/snø faller ned og gir kortslutning ved at faser slår sammen	1	3	3
Seksjon 4	Saltbelegg fra sjøsprøyt gir overslag fra linje/isolator uten gjeninnkobling	3	3	9
	Saltbelegg fra sjøsprøyt gir (dobbel) jordslutning uten gjeninnkobling	3	3	9
	Vind gir fasesammenslag med mislykket gjeninnkobling	3	4	12
Seksjon 5	Vind gjør at trær velter over linje	3	3	9
	Vind gjør at trær kommer i kontakt med linjer med mislykket innkobling	3	3	9
	Vind gjør at trær velter over stolpe	3	3	9
	Sterke vinder fører til at trær velter over et stort område	5	1	5

I følge forskrift om beredskap i kraftforsyningen har hendelser med verdi 1-2 lav risiko og krever ingen tiltak. Hendelser med verdi 3-9 har en middels risiko og krever en kritisk vurdering om tiltak skal iverksettes evt omfattende analyse gjennomføres. Hendelser med verdi 10-20 er høyrisiko hendelser som er uakseptable og krever tiltak.

---

## Vedlegg 6

### Sårbarhetsindikator, case

Sårbarhetsindikatoren består som nærmere forklart i oppgaven av utetid for karakteristisk effekt (maksimal effekt i caset) og KILE pr kunde pr time.

#### Utetid for maksimal effekt:

Hendelser som ikke fører til forsyningsbrudd har naturlig nok utetid lik null. For de andre hendelsene gjelder:

$$\text{ILE}/P_{\text{maks}} \quad \text{der } P_{\text{maks}} = 12 \text{ MW}$$

Som gir:

Hendelse	ILE	Sårbarhetsindikator
Overslag i seksjon 4	10 200	0,85
Jordslutning i seksjon 4	10 200	0,85
Fasesammenslag i seksjon 4	10 200	0,85
Trær over linje i seksjon 5	42 000	3,5
Trær i kontakt med linjer i seksjon 5	30 000	2,5
Trær over stolpe i seksjon 5	66 000	5,5
Utstrakt ødeleggelse seksjon 5	1 014 000	84,5

#### KILE pr kunde pr time

KILE for de to avbruddstilfellene blir som følger:

Fullstendig avbrudd<sup>7</sup>: 26,46 NOK/kWh

Delvis avbrudd<sup>8</sup>: 11,42 NOK/kWh

Ved fullstendig forsyning er KILE nødvendig vis lik null.

---

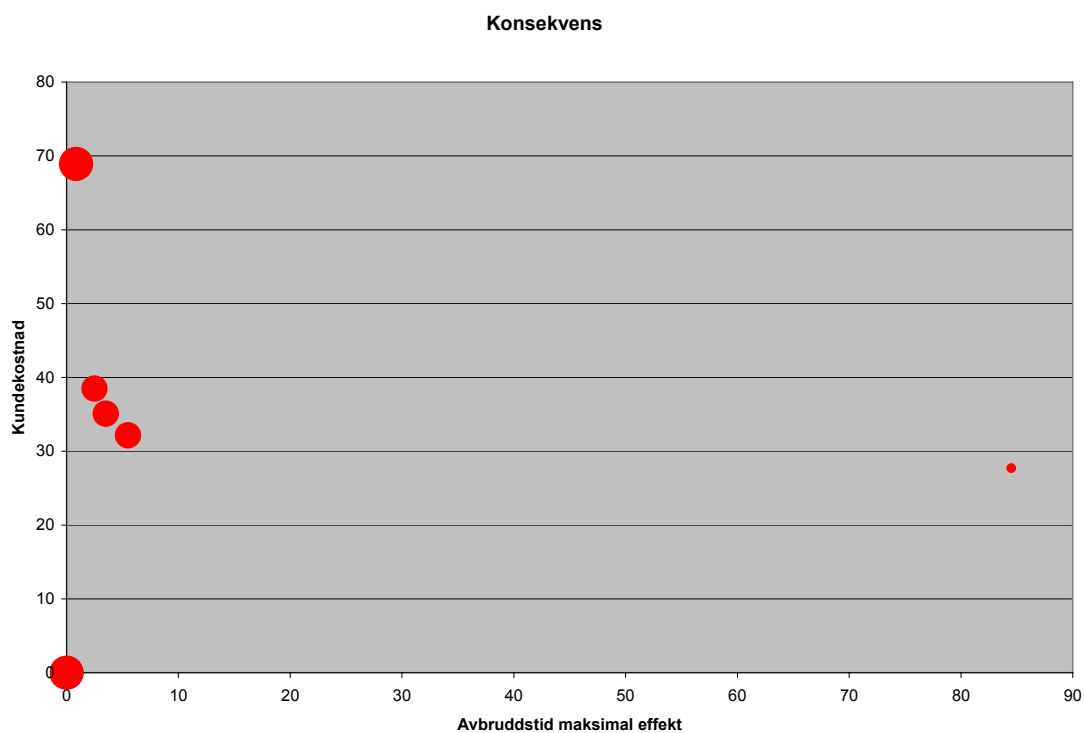
<sup>7</sup>  $0,1*69,9+0,1*103,3+0,3*13,9+0,05*13,4+0,05*15,5+0,4*8,8 = 26,46$

<sup>8</sup>  $0,35*13,9+0,08*13,4+0,07*15,5+0,5*8,8 = 11,42$

Dette gir følgende resultat for feilhendelsene som resulterer i forsyningsbrudd:

Hendelse	Avbruddskost pr kunde [NOK/kunde]	Gjennomsnittlig Kundekostnad [NOK/kunde*time <sup>9</sup> ]
Overslag i seksjon 4	82,69	68,91
Jordslutning i seksjon 4	82,69	68,91
Fasesammenslag i seksjon 4	82,69	68,91
Trær over linje i seksjon 5	227,95	35,07
Trær i kontakt med linjer i seksjon 5	173,14	38,47
Trær over stolpe i seksjon 5	337,58	32,15
Utstrakt ødeleggelse seksjon 5	4668,05	27,70

Grafen under viser gjennomsnittlig kundekostnad pr time og I:



For beregning av risiko brukes følgende kunderelaterte avbruddskostnader. Konsekvens i siste kolonne refererer i denne sammenheng til det totale KILE beløpet.

Hendelse	KILE [NOK]	KILE pr kunde <sup>10</sup>	Konsekvens
Overslag i seksjon 4	206 724	83	3

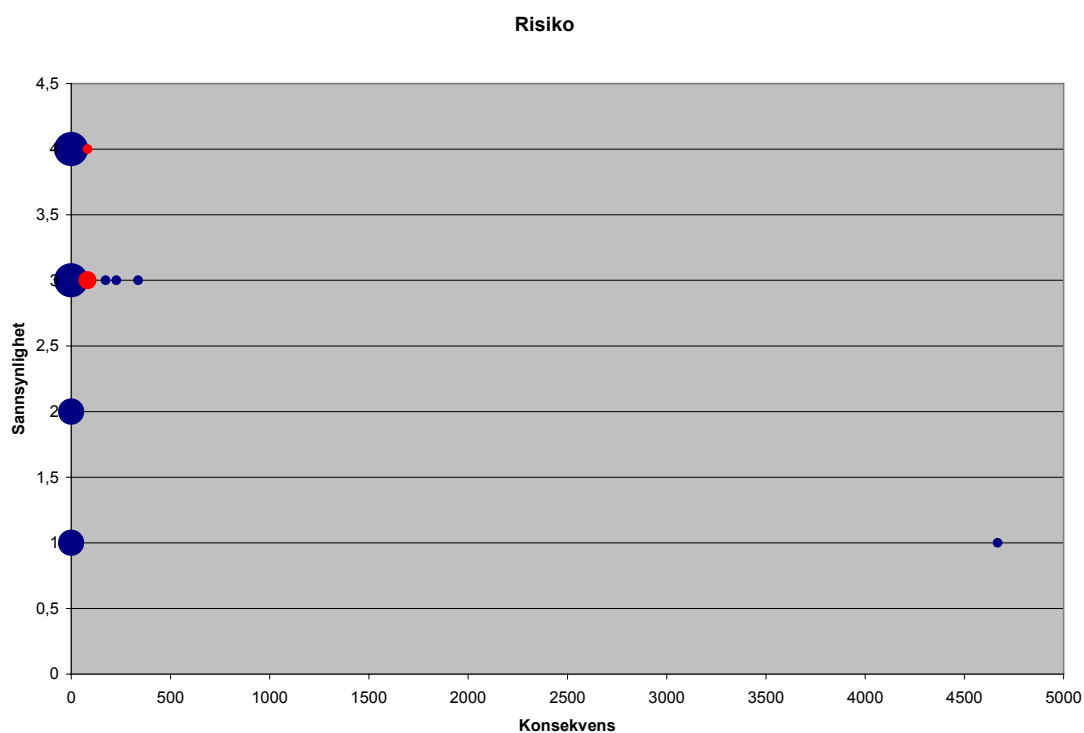
<sup>9</sup> Per reel time avbrudd (ikke avbruddstid for maksimal effekt)

<sup>10</sup> KILE dividert på antall sluttbrukere som er 2500



Jordslutning i seksjon 4	206 724	83	3
Fasesammenslag i seksjon 4	206 724	83	3
Trær over linje i seksjon 5	569 880	228	3
Trær i kontakt med linjer i seksjon 5	432 840	173	3
Trær over stolpe i seksjon 5	843 960	338	3
Utstrakt ødeleggelse seksjon 5	11 670 120	4668	1

Grafen under viser risiko der konsekvens er representert ved kundenes gjennomsnittlige totale kostnad (KILE pr kunde). Tilsvarende kan en lage en graf der konsekvens er representert ved kategoriene brukt i ROS veiledningen. Dette er gjort i oppgavens hoveddel.



**Utetid for maksimal effekt**

Fullstendig utfall	12000	KW	Abonnementer	2500
Delvis utfall	6000	KW		
KILE fullstendig	26,46	NOK/KWh		
KILE delvis	1,42	NOK/KWh		

Seksjon	Hendelser	Utkoblet effekt			
		Helt	Delvis	I.L.E (kWh)	SI
Seksjon 1	Avslitte aluminiumstråder	0	0	0	0
Seksjon 2	Trær i kontakt med linjer med mistykket gjennomkobling	0	0	0	0
	Trær veltet over linje	0	0	0	0
	Trær veltet over stolpe	0	0	0	0
Seksjon 3	Lymnedslag gir jordfeil med mistykket gjennomkobling	0	0	0	0
	Lymnedslag gir kortslutning med mistykket gjennomkobling	0	0	0	0
	Lymnedslag fører til ødelagt bryter	0	0	0	0
	Lymnedslag fører til ødelagt transformator	0	0	0	0
	Vind gir fasesammenheng med mistykket gjennomkobling	0	0	0	0
	Vind fører til at en mast bryter sammen	0	0	0	0
	Sterke vinder gir ødeleggelse over et større område	0	0	0	0
	Is og snø fører til at en mast veltet	0	0	0	0
Seksjon 4	Is/snø fører til at en linje ryker	0	0	0	0
	Is/snø faller ned og gir kortslutning ved at faser slår sammen	0,50	0,7	10200	0,85
	Saltbelegg fra sjøsprøyt gir overslag fra linje eller isolator til jord uten	0,50	0,7	10200	0,85
Seksjon 5	Vind gir fasesammenheng med mistykket gjennomkobling	0,50	0,7	10200	0,85
	Vind gjør at trær veltet over linjene	0,50	6	42000	3,5
	Vind gjør at trær kommer i kontakt med linjer med mistykket innkobling	0,50	4	30000	2,5
	Vind gjør at trær veltet over stolpe	0,50	10	66000	5,5
	Sterke vinder fører til at trær veltet over et stort område	0,50	168	1074000	84,5

**KILE pr kunde pr time**

Fullstendig utfall	12000 kW	Abonnementer	2500
Dølviss utfall	6000 kW		
KILE fullstendig	26,46 NOK/KWh		
KILE dølviss	11,42 NOK/KWh		

Seksjon	Hendelser	KILE	KILE pr kunde	gj.snitt kundekost
Seksjon 1	Avslitte aluminiumstråder	0	0	0
Seksjon 2	Trær i kontakt med linjer med mislykket gjeninnkobling	0	0	0
	Trær vetter over linje	0	0	0
	Trær vetter over stolpe	0	0	0
Seksjon 3	Lynnedslag gir jordfeil med mislykket gjeninnkobling	0	0	0
	Lynnedslag gir kortslutning med mislykket gjeninnkobling	0	0	0
	Lynnedslag fører til ødelagt bryter	0	0	0
	Lynnedslag fører til ødelagt transformator	0	0	0
	Vind gir fasesammenheng med mislykket gjeninnkobling	0	0	0
	Vind fører til at en mast bryter sammen	0	0	0
	Sterke vinder gir ødeleggelser over et større område	0	0	0
	Is og snø fører til at en mast vetter	0	0	0
	Is/snø fører til at en linje rykker	0	0	0
	Is/snø faller ned og gir kortslutning ved at faser slår sammen	0	0	0
Seksjon 4	Saltbelegg fra sjøsprøyt gir overslag fra linje eller isolator til jord uten gjeninnkobling	206724	82,69	68,91
	Saltbelegg fra sjøsprøyt gir (dobbel) jordslutning med mislykket gjeninnkobling	206724	82,69	68,91
	Vind gir fasesammenheng med mislykket gjeninnkobling	206724	82,69	68,91
Seksjon 5	Vind gjør at trær vetter over linjene	569880	227,95	35,07
	Vind gjør at trær kommer i kontakt med linjer med mislykket innkobling	432840	173,14	38,47
	Vind gjør at trær vetter over stolpe	843960	337,58	32,15
	Sterke vinder fører til at trær vetter over et stort område	11670120	4668,05	27,70