

# Analyse av seksjoneringsmetodikker i høyspennings distribusjonsnett

**Emil Hjelmseth Olsen**

Master i energibruk og energiplanlegging

Innlevert: juni 2018

Hovedveileder: Kjell Sand, IEL

Medveileder: Sjur Messel Nafstad, Powel AS

Line Bergfjord, BKK Nett

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet

Institutt for elkraftteknikk



---

# Sammendrag

Myndighetenes regulering av nettselskapers inntektsrammer gir insentiver til opprettholdelse av høy leveringspålitelighet og kostnadseffektiv drift og nødvendig utbygging av strømmettet. Et viktig element som inngår i nettselskapenes kostnadsgrunnlag er de kvalitetsjusterte inntektsrammene ved ikke levert energi (KILE-ordningen), som representerer de totale samfunnsøkonomiske kostnadene som påføres sluttbrukere ved avbrudd. Nettselskapenes inntekter vil dermed reduseres som følge av avbrudd, og KILE-ordningen fungerer som et insentiv for å opprettholde leveringspåliteligheten. Bruk av optimal seksjoneringsmetode og seksjoneringsmetodikk er en av mange måter å forbedre påliteligheten og redusere de årlige KILE-kostnadene. Formålet med denne rapporten er å utvikle en metodikk for beregning av optimal seksjoneringsmetodikk i forenklete høyspennings luft- og kabelnett modeller.

Den etablerte metodikken for pålitelighetsanalyser av seksjoneringsmetodikker baserer seg på bruk av RELRAD-metoden. For å fastlegge optimal seksjoneringsmetodikk er pålitelighetsindekser og årlig forventede avbruddskostnader vurdert opp mot forventet antall innkoblinger mot varige feil og innvirkningene fra spenningsfenomener, aldringsmekanismer og personsikkerhet som de påfølgende feilstrømmene medfører. For å finne optimal seksjoneringsmetodikk er det utført separate pålitelighetsanalyser for hver av metodikkene i to fiktive nettmodeller som representerer høyspennings luft- og kabelnett.

I prosessen med å finne feilsted blir strømmettet systematisk seksjonert opp. I luftnett seksjoneres nettet ved hjelp av prøvekoblinger, mens kabelnett kan både seksjoneres ved hjelp av prøvekoblinger og isolasjonsmålinger. Resultatene av pålitelighetsanalysene viser at seksjonering ved hjelp av prøvekoblinger gir langt bedre pålitelighet og lavere avbruddskostnader enn for isolasjonsmålinger, men isolasjonsmålinger eliminerer risiko for innkoblinger mot varige feil. For seksjonering ved hjelp av isolasjonsmålinger i kabelnett er det seksjoneringsmetodikken *halvering av forventet KILE* som er optimal, da metodikken gir lavest avbruddskostnader og god pålitelighet samtidig som det ikke forekommer noen ekstra økonomiske innvirkninger og personsikkerheten ivaretas. For seksjonering ved hjelp av prøvekoblinger er det metodikken *halvering av forventet KILE* som gir lavest avbruddskostnader i kabelnett, mens i luftnett er det metodikkene *halvering av lengde av radial* og *halvering av feilfrekvens*. Det fremkommer av resultatene at seksjoneringsmetodikkene som gir god pålitelighet og lave avbruddskostnader ofte har høye forventningsverdier for innkobling mot feil. Innkoblinger mot feil gir store feilstrømmer som potensielt kan påvirke personsikkerheten og kan medføre direkte og indirekte kostnader tilknyttet fenomenene spenningsdipp, spenningsusymmetri, overspenninger og aldring av komponenter. Metodikkene med lavest forventet avbruddskostnader er derfor ikke nødvendigvis optimal, da andre metodikker kan gi færre innkoblinger mot feil. I og med de økonomiske innvirkninger tilknyttet noen av kriteriene ikke er kvantifisert, er det ikke konkludert med at en bestemt metodikk er optimal for seksjonering ved hjelp av prøvekoblinger. Metodikkene som gir lavest avbruddskostnader anbefales, men metodikker som gir litt høyere avbruddskostnader og langt færre innkoblinger mot feil anses også som gode alternativer.

Følsomhetsanalysene viser at skalering av lengder og feilfrekvenser ikke påvirker utfallet av resultatene. Individuelle endringer av parametere vil derimot påvirke seksjoneringsforløpene. Endringer i kundesammensetning har også stor påvirkning, da enkelte av metodikkene er direkte avhengig av de spesifikke avbruddskostnadene som beregnes ut fra kundesammensetningen. Basert på resultater kan en konkludere med at valg av seksjoneringsmetodikk har stor betydning for påliteligheten, og optimering av seksjoneringsprosessen kan være en effektiv måte å redusere KILE-kostnader. Alle strømmett er forskjellige, noe som gjør det enda viktigere å utføre pålitelighetsanalyser før underliggende seksjoneringsmetodikk fastsettes.

---

# Abstract

The authorities' regulation of grid companies revenue caps gives network owners incentive to maintain high reliability and cost-effective operation and development of the grid. An important element included in the grid companies cost basis is the quality dependent revenue caps, the cost of energy not supplied (CENS), which represents the total socio-economic costs incurred by end-users in the event of an interruption. Grid companies' revenues will be reduced as a result of interruptions, and the CENS gives incentive to maintain high reliability. One of many ways to improve the reliability and reduce the annual CENS is to optimize fault localising and sectioning routines. The purpose of this report is to establish a method for calculating optimal sectioning algorithm in high voltage distribution networks.

The established method for reliability analyses are based on the use of the RELRAD method. In order to find optimal sectioning algorithm, reliability indices and annual expected CENS are assessed against the expected number of long interruptions and the effects of voltage phenomena, aging mechanisms and personal safety that the subsequent interruptions cause. The reliability analyses have been performed on two different fictional analysis models. The analysis models have been developed in cooperation with the main supervisor and co-supervisors, and represents high-voltage overhead- and cable network models.

In the process of finding the fault location, the grid is systematically sectioned. In overhead networks sectioning of faults is performed by means of test switching, while in cable networks both test switching and megging can be performed. The results of the reliability analyses show that sectioning of faults by means of test switching provides far better reliability and lower CENS than megging, but megging eliminate the risk of faulty reconnections. Using megging in the cable network, the sectioning algorithm *halve expected CENS* is optimal, as the methodology provides the lowest interruption costs and good reliability while no additional economic impacts and personal safety are observed. For sectioning by the means of test switching, the sectioning algorithm *halve expected CENS* gives the lowest interruption costs in the cable network model, while *halve length of radial* and *halve failure rates* gives the lowest interruption costs in the overhead network model. It appears from the results that although the sectioning algorithm provides good reliability and low interruption costs, the expected value of faulty reconnection is relatively high. Faulty reconnections give rise to large failure currents that affect personal safety and can lead to direct and indirect costs associated with the phenomenon of voltage drop, voltage unsymmetry, overvoltages and aging of components. Therefore, the sectioning algorithm with the lowest expected interruption costs are not necessarily optimal, as other methodologies may lead to less faulty reconnections. As not all the economic impacts associated with the criteria are quantified, it has been decided not to conclude that a particular sectioning algorithm is optimal for sectioning by the means of test switching. The sectioning algorithm that provide the lowest annual CENS are recommended, but methodologies that provide slightly higher interruption costs and less faulty reconnections are also considered as good alternatives.

The sensitivity analysis shows that scaling of lengths and failure rates do not affect the outcome of the original results. However, individual changes to parameters may lead to major changes in the sectioning processes. Changes in customer composition also have a great impact, as some of the sectioning algorithms are directly dependent on the specific interruption costs which is calculated from the customer composition. It appears from the results and sensitivity analysis that optimization of sectioning algorithms for fault localization in distribution systems is of great importance to the reliability, and can be an effective way to reduce the CENS. All power grids are different, which makes it even more important to perform reliability analysis before the underlying sectioning algorithm is determined.

---

# Forord

Denne masteroppgaven avslutter mitt studie innen Energibruk og Energiplanlegging ved Institutt for elkraftteknikk ved Norges teknisk-naturvitenskaplige universitet. Oppgaven utgjør de siste 30 studiepoengene som omfatter graden Master i teknologi/sivilingeniør i Energibruk og energiplanlegging, og ble skrevet våren 2018.

Oppgaven er gitt i samarbeid med Powel AS og BKK Nett og omhandler analyser av ulike metodikker for seksjonering av høyspennings luft- og kabelnett. Masteroppgaven er et selvstendig vitenskapelig arbeid som bygger videre på fordypningsprosjektet *Optimal investering i fjernstyrte brytere og overvåkning i distribusjonsnettet*, høsten 2017. Hovedveileder for oppgaven har vært Kjell Sand, og medveiledere har vært Sjur Messel Nafstad i Powel AS og Line Bergfjord i BKK Nett.

Jeg vil gjerne rette en stor takk til Kari Merete Nilsen i BKK Nett, Geir Solum og Anders Bergem i TrønderEnergi, og Vidar Frøstad og Oddvar Stavrum i NTE for fremskaffing av nødvendig data og samtaler om seksjonering i distribusjonsnettet og nettsentralens praksis. Til slutt vil jeg takke mine to medveiledere og min hovedveileder for gode råd, innspill og oppfølging underveis i arbeidet.

Trondheim, 06.06.2018



Emil Hjelmseth Olsen

# Innholdsfortegnelse

<b>Sammendrag</b>	<b>i</b>
<b>Abstract</b>	<b>ii</b>
<b>Forord</b>	<b>iii</b>
<b>Innholdsfortegnelse</b>	<b>vi</b>
<b>Tabelliste</b>	<b>ix</b>
<b>Figurliste</b>	<b>xi</b>
<b>Begrepsforklaring</b>	<b>xii</b>
<b>Symbolliste</b>	<b>xiii</b>
<b>1 Innledning</b>	<b>1</b>
1.1 Beskrivelse av oppgave . . . . .	1
1.2 Bakgrunn og formål . . . . .	2
1.3 Oppgavens struktur . . . . .	2
<b>2 Leveringspålitelighet - kostnader ved avbrudd</b>	<b>3</b>
2.1 Kvalitetsjusterte inntektsrammer for ikke levert energi . . . . .	3
<b>3 Pålitelighetsanalyse</b>	<b>7</b>
3.1 Grunnleggende teori for distribusjonsnett . . . . .	7
3.1.1 Seriestruktur . . . . .	8
3.1.2 Parallellstruktur . . . . .	8
3.2 Pålitelighetsindekser . . . . .	9
3.2.1 Kundeorienterte pålitelighetsindekser . . . . .	9
3.2.2 Last- og energiorienterte pålitelighetsindekser . . . . .	10
3.3 RELRAD-metoden . . . . .	11
<b>4 Høyspennings distribusjonsnett</b>	<b>13</b>
4.1 Nettyper . . . . .	14
4.1.1 Luftnett . . . . .	14
4.1.2 Kabelnett . . . . .	15
4.1.3 Blandet nett . . . . .	15
4.2 Feiltyper . . . . .	16
4.3 Feilstatistikk i høyspennings distribusjonsnett . . . . .	17
<b>5 Feilhåndtering i distribusjonsnett</b>	<b>20</b>
5.1 Seksjonering . . . . .	20
5.1.1 Prøvekobling . . . . .	20

---

5.1.2	Isolasjonsmåling . . . . .	21
5.2	Feilrettingsforløp ved avbrudd . . . . .	22
<b>6</b>	<b>Seksjoneringsmetodikk</b>	<b>25</b>
6.1	Seksjoneringsmetodikker brukt av nettselskaper . . . . .	26
6.1.1	Nettselskap 1 . . . . .	26
6.1.2	Nettselskap 2 . . . . .	27
6.1.3	Nettselskap 3 . . . . .	27
6.1.4	Oppsummering . . . . .	28
6.2	Seksjoneringsmetodikker for luftnett-modell . . . . .	30
6.2.1	Halveringsprinsippet - halvering av antall nettstasjoner . . . . .	30
6.2.2	Halveringsprinsippet - halvering av lengde av radial . . . . .	32
6.2.3	Halveringsprinsippet - halvering av feilfrekvens . . . . .	33
6.2.4	Halveringsprinsippet - halvering av KILE-satser . . . . .	34
6.2.5	Halveringsprinsippet - halvering av forventet KILE . . . . .	35
6.2.6	Sekvensiell seksjonering . . . . .	37
6.3	Seksjoneringsmetodikker for kabelnett-modell . . . . .	38
6.3.1	Halveringsprinsippet - halvering av antall nettstasjoner . . . . .	39
6.3.2	Halveringsprinsippet - halvering av lengde av radial . . . . .	41
6.3.3	Halveringsprinsippet - halvering av feilfrekvens . . . . .	42
6.3.4	Halveringsprinsippet - halvering av KILE-satser . . . . .	43
6.3.5	Halveringsprinsippet - halvering av forventet KILE . . . . .	44
6.3.6	Sekvensiell seksjonering . . . . .	45
<b>7</b>	<b>Kriterier for seksjonering</b>	<b>46</b>
7.1	Leveringspålitelighets kriterier . . . . .	46
7.2	Spenningskvalitets kriterier . . . . .	47
7.2.1	Spenningsdipp . . . . .	47
7.2.2	Overspenninger . . . . .	47
7.2.3	Spenningsusymmetri . . . . .	47
7.2.4	Økonomiske konsekvenser av redusert spenningskvalitet . . . . .	48
7.3	Aldring av elektriske komponenter . . . . .	48
7.4	Personsikkerhet . . . . .	49
<b>8</b>	<b>Beskrivelse av nettmodeller</b>	<b>50</b>
8.1	Luftnett-modell . . . . .	50
8.1.1	Nettspesifikasjon for luftnett-modell . . . . .	50
8.2	Kabelnett-modell . . . . .	52
8.2.1	Nettspesifikasjon for kabelnett-modell . . . . .	52
8.3	Forutsetninger . . . . .	54
8.4	Feilhåndteringstider . . . . .	55
8.5	Beskrivelse av seksjoneringsforløp . . . . .	56
<b>9</b>	<b>Illustrasjon av fremgangsmetode</b>	<b>59</b>
9.1	Gjennomsnittlig avbruddsvarigheter . . . . .	59
9.2	Innkoblinger mot varige feil . . . . .	61
9.3	Pålitelighetsindekser . . . . .	62
<b>10</b>	<b>Resultater</b>	<b>63</b>
10.1	Luftnett-modell . . . . .	64
10.1.1	Rangering av seksjoneringsmetodikker i luftnett-modell . . . . .	66
10.2	Kabelnett-modell . . . . .	67

---

---

10.2.1	Rangering av seksjoneringsmetodikker i kabelnett-modell . . . . .	70
<b>11</b>	<b>Følsomhetsanalyse</b>	<b>71</b>
11.1	Skalering av lengder . . . . .	71
11.2	Skalering av feilfrekvenser . . . . .	72
11.3	Endring i kundesammensetning . . . . .	74
11.3.1	Resultater for luftnett-modell . . . . .	75
11.3.2	Rangering av seksjoneringsmetodikker i luftnett-modell . . . . .	76
11.3.3	Resultater for kabelnett-modell . . . . .	77
11.3.4	Rangering av seksjoneringsmetodikker i kabelnett-modell . . . . .	80
<b>12</b>	<b>Diskusjon</b>	<b>81</b>
12.1	Resultater . . . . .	81
12.2	Følsomhetsanalyse . . . . .	84
12.3	Forutsetninger og forenklinger . . . . .	85
12.4	Seksjoneringsmetodikker . . . . .	86
<b>13</b>	<b>Konklusjon</b>	<b>88</b>
<b>14</b>	<b>Videre arbeid</b>	<b>90</b>
	<b>Bibliografi</b>	<b>91</b>
	<b>Vedlegg</b>	<b>94</b>
	Vedlegg A: Korreksjonsfaktorer . . . . .	94
	Vedlegg B: Eksempel på seksjoneringsforløp i luftnett-modell . . . . .	95
	Vedlegg C: Eksempel på seksjoneringsforløp i kabelnett-modell . . . . .	98
	Vedlegg D: Resultater fra luftnett-modell . . . . .	103
	D.1: Halveringsprinsippet - halvering av antall nettstasjoner . . . . .	103
	D. 1.1: Sekundærkriterie - Nærmeste nettstasjon . . . . .	103
	D. 1.2: Sekundærkriterie - Sannsynlighet for innkobling mot varig feil . . . . .	106
	D.2: Halveringsprinsippet - halvering av lengde av radial . . . . .	109
	D.3: Halveringsprinsippet - halvering av feilfrekvens . . . . .	112
	D.4: Halveringsprinsippet - halvering av KILE-satser . . . . .	112
	D.5: Halveringsprinsippet - halvering av forventet KILE . . . . .	115
	D.6: Sekvensiell seksjonering . . . . .	115
	Vedlegg E: Resultater fra kabelnett-modell . . . . .	118
	E.1: Halveringsprinsippet - halvering av antall nettstasjoner . . . . .	118
	E. 1.1: Sekundærkriterie - Nærmeste nettstasjon . . . . .	118
	E. 1.2: Sekundærkriterie - Sannsynlighet for innkobling mot varig feil . . . . .	121
	E.2: Halveringsprinsippet - halvering av lengde av radial . . . . .	124
	E.3: Halveringsprinsippet - halvering av feilfrekvens . . . . .	127
	E.4: Halveringsprinsippet - halvering av KILE-satser . . . . .	127
	E.5: Halveringsprinsippet - halvering av forventet KILE . . . . .	127
	E.6: Sekvensiell seksjonering . . . . .	130

---



# Tabelliste

2.1	Spesifikke avbruddskostnader for ikke-varslet avbrudd på ref.tidspunkt [3] . . . . .	4
2.2	Referansetidspunkt for kundegrupper [3] . . . . .	5
4.1	Fordeling av feil og tilhørende ILE på anleggsdeler [24] . . . . .	17
6.1	Oppsummering av seksjoneringsmetodikker brukt av nettselskaper . . . . .	29
8.1	Kundesammensetning i seksjoner i luftnett-modell . . . . .	51
8.2	Gjennomsnittlig KILE-satser i seksjoner i luftnett-modell . . . . .	51
8.3	Kundesammensetning i lastpunkter i kabelnett-modell . . . . .	53
8.4	Gjennomsnittlig KILE-satser i lastpunkter i kabelnett-modell . . . . .	53
9.1	Gjennomsnittlig avbruddvarighet ( $r$ ) i seksjoner . . . . .	60
9.2	Årlig forventet avbruddvarighet i seksjoner . . . . .	60
9.3	Antall innkoblinger mot varig feil i seksjoner . . . . .	61
9.4	Årlig forventet antall innkoblinger mot varig feil i seksjoner . . . . .	61
9.5	Forventede KILE-kostnader . . . . .	62
9.6	Pålitelighetsindekser for gitt seksjoneringsmetodikk . . . . .	62
10.1	Oppsummering av pålitelighetsindekser i luftnett-modell . . . . .	65
10.2	Oppsummering av årlig antall innkoblinger mot varig feil i luftnett-modell . . . . .	66
10.3	Rangering av seksjoneringsmetodikker i luftnett-modell . . . . .	66
10.4	Oppsummering av pålitelighetsindekser i kabelnett-modell . . . . .	69
10.5	Oppsummering av årlig antall innkoblinger mot varig feil i kabelnett-modell . . . . .	70
10.6	Rangering av seksjoneringsmetodikker i kabelnett-modell . . . . .	70
11.1	Kundesammensetning i de ulike seksjonene i luftnett-modell . . . . .	74
11.2	Kundesammensetning i lastpunktene i kabelnett-modell . . . . .	74
11.3	Gjennomsnittlig KILE-satser i luftnett-modell . . . . .	74
11.4	Gjennomsnittlig KILE-satser i kabelnett-modell . . . . .	74
11.5	Oppsummering av pålitelighetsindekser i luftnett-modell . . . . .	75
11.6	Oppsummering av årlig antall innkoblinger mot varig feil i luftnett-modell . . . . .	75
11.7	Rangering av seksjoneringsmetodikker i luftnett-modell . . . . .	76
11.8	Oppsummering av pålitelighetsindekser i kabelnett-modell . . . . .	79
11.9	Oppsummering av årlig antall innkoblinger mot varig feil i kabelnett-modell . . . . .	80
11.10	Rangering av seksjoneringsmetodikker i kabelnett-modell . . . . .	80
D1	Gjennomsnittlig avbruddvarighet ( $r$ ) i seksjoner . . . . .	103
D2	Årlig forventet avbruddvarighet i seksjoner . . . . .	103
D3	Antall innkoblinger mot feil i seksjoner . . . . .	104
D4	Årlig antall forventede innkoblinger mot feil i seksjoner . . . . .	104
D5	Forventede KILE-kostnader . . . . .	105
D6	Pålitelighetsindekser for gitt seksjoneringsmetodikk . . . . .	105
D7	Gjennomsnittlig avbruddvarighet ( $r$ ) i seksjoner . . . . .	106

---

D8	Årlig forventet avbruddsvarighet i seksjoner . . . . .	106
D9	Antall innkoblinger mot feil i seksjoner . . . . .	107
D10	Årlig antall forventede innkoblinger mot feil i seksjoner . . . . .	107
D11	Forventede KILE-kostnader . . . . .	108
D12	Pålitelighetsindekser for gitt seksjoneringsmetodikk . . . . .	108
D13	Gjennomsnittlig avbruddsvarighet (r) i seksjoner . . . . .	109
D14	Årlig forventet avbruddsvarighet i seksjoner . . . . .	109
D15	Antall innkoblinger mot feil i seksjoner . . . . .	110
D16	Årlig antall forventede innkoblinger mot feil i seksjoner . . . . .	110
D17	Forventede KILE-kostnader . . . . .	111
D18	Pålitelighetsindekser for gitt seksjoneringsmetodikk . . . . .	111
D19	Gjennomsnittlig avbruddsvarighet (r) i seksjoner . . . . .	112
D20	Årlig forventet avbruddsvarighet i seksjoner . . . . .	112
D21	Antall innkoblinger mot feil i seksjoner . . . . .	113
D22	Årlig antall forventede innkoblinger mot feil i seksjoner . . . . .	113
D23	Forventede KILE-kostnader . . . . .	114
D24	Pålitelighetsindekser for gitt seksjoneringsmetodikk . . . . .	114
D25	Gjennomsnittlig avbruddsvarighet (r) i seksjoner . . . . .	115
D26	Årlig forventet avbruddsvarighet i seksjoner . . . . .	115
D27	Antall innkoblinger mot feil i seksjoner . . . . .	116
D28	Årlig antall forventede innkoblinger mot feil i seksjoner . . . . .	116
D29	Forventede KILE-kostnader . . . . .	117
D30	Pålitelighetsindekser for gitt seksjoneringsmetodikk . . . . .	117
E31	Gjennomsnittlig avbruddsvarighet (r) i lastpunkter . . . . .	118
E32	Årlig forventet avbruddsvarighet i lastpunkter . . . . .	118
E33	Antall innkoblinger mot feil i seksjoner . . . . .	119
E34	Årlig antall forventede innkoblinger mot feil i seksjoner . . . . .	119
E35	Forventet KILE-kostnader i lastpunkter . . . . .	119
E36	Pålitelighetsindekser for gitt seksjoneringsmetodikk . . . . .	119
E37	Gjennomsnittlig avbruddsvarighet (r) i lastpunkter . . . . .	120
E38	Årlig forventet avbruddsvarighet i lastpunkter . . . . .	120
E39	Forventet KILE-kostnader i lastpunkter . . . . .	120
E40	Pålitelighetsindekser for gitt seksjoneringsmetodikk . . . . .	120
E41	Gjennomsnittlig avbruddsvarighet (r) i lastpunkter . . . . .	121
E42	Årlig forventet avbruddsvarighet i lastpunkter . . . . .	121
E43	Antall innkoblinger mot feil i seksjoner . . . . .	122
E44	Årlig antall forventede innkoblinger mot feil i seksjoner . . . . .	122
E45	Forventet KILE-kostnader i lastpunkter . . . . .	122
E46	Pålitelighetsindekser for gitt seksjoneringsmetodikk . . . . .	122
E47	Gjennomsnittlig avbruddsvarighet (r) i lastpunkter . . . . .	123
E48	Årlig forventet avbruddsvarighet i lastpunkter . . . . .	123
E49	Forventet KILE-kostnader i lastpunkter . . . . .	123
E50	Pålitelighetsindekser for gitt seksjoneringsmetodikk . . . . .	123
E51	Gjennomsnittlig avbruddsvarighet (r) i lastpunkter . . . . .	124
E52	Årlig forventet avbruddsvarighet i lastpunkter . . . . .	124
E53	Antall innkoblinger mot feil i seksjoner . . . . .	125
E54	Årlig antall forventede innkoblinger mot feil i seksjoner . . . . .	125
E55	Forventet KILE-kostnader i lastpunkter . . . . .	125
E56	Pålitelighetsindekser for gitt seksjoneringsmetodikk . . . . .	125
E57	Gjennomsnittlig avbruddsvarighet (r) i lastpunkter . . . . .	126
E58	Årlig forventet avbruddsvarighet i lastpunkter . . . . .	126

---

---

E59	Forventet KILE-kostnader i lastpunkter . . . . .	126
E60	Pålitelighetsindekser for gitt seksjoneringsmetodikk . . . . .	126
E61	Gjennomsnittlig avbruddvarighet (r) i lastpunkter . . . . .	127
E62	Årlig forventet avbruddvarighet i lastpunkter . . . . .	127
E63	Antall innkoblinger mot feil i seksjoner . . . . .	128
E64	Årlig antall forventede innkoblinger mot feil i seksjoner . . . . .	128
E65	Forventet KILE-kostnader i lastpunkter . . . . .	128
E66	Pålitelighetsindekser for gitt seksjoneringsmetodikk . . . . .	128
E67	Gjennomsnittlig avbruddvarighet (r) i lastpunkter . . . . .	129
E68	Årlig forventet avbruddvarighet i lastpunkter . . . . .	129
E69	Forventet KILE-kostnader i lastpunkter . . . . .	129
E70	Pålitelighetsindekser for gitt seksjoneringsmetodikk . . . . .	129
E71	Gjennomsnittlig avbruddvarighet (r) i lastpunkter . . . . .	130
E72	Årlig forventet avbruddvarighet i lastpunkter . . . . .	130
E73	Antall innkoblinger mot feil i seksjoner . . . . .	131
E74	Årlig antall forventede innkoblinger mot feil i seksjoner . . . . .	131
E75	Forventet KILE-kostnader i lastpunkter . . . . .	131
E76	Pålitelighetsindekser for gitt seksjoneringsmetodikk . . . . .	131
E77	Gjennomsnittlig avbruddvarighet (r) i lastpunkter . . . . .	132
E78	Årlig forventet avbruddvarighet i lastpunkter . . . . .	132
E79	Forventet KILE-kostnader i lastpunkter . . . . .	132
E80	Pålitelighetsindekser for gitt seksjoneringsmetodikk . . . . .	132

# Figurliste

2.1	Spesifikke avbruddskostnader i 2012-kroner pr. kW [15]	4
3.1	Tilstandssyklus for enkeltkomponent [17]	7
3.2	Illustrasjon av seriestruktur for pålitelighetsberegninger [18]	8
3.3	Illustrasjon av parallellstruktur for pålitelighetsberegninger [18]	8
3.4	Illustrasjon av ikke levert energi for radialnett [9]	10
3.5	Illustrasjon av den klassiske metoden vs RELRAD-metoden [19]	11
3.6	Flytskjema for RELRAD-metodikken [19]	12
4.1	Prinsipiell illustrasjon av høyspennings fordelingsnett med nettstasjoner [20]	13
4.2	Illustrasjon av prinsipiell oppbygging av høyspennings luftnett [21]	14
4.3	Illustrasjon av prinsipiell oppbygging av høyspennings kabelnett [21]	15
4.4	Illustrasjon av feiltyper i trefase-systemer [20]	16
4.5	Årlig antall feil i høyspennings distribusjonsnett [25]	17
4.6	Utløsende årsaker til driftsforstyrrelser i distribusjonsnettet [3]	18
4.7	Andel driftsforstyrrelser med utløsende årsak, kategori <i>omgivelser</i> [24]	18
4.8	Andel ILE pga. driftsforstyrrelser med utløsende årsak, kategori <i>omgivelser</i> [24]	19
5.1	Illustrasjon av isolasjonsmåling [29]	21
5.2	Feilrettingsforløp grunnet varig feil som medfører avbrudd [1]	24
6.1	Flytskjema av metodikken <i>halvering av antall nettstasjoner</i> med sekundærkriteriet <i>nærmeste nettstasjon</i> for luftnett	30
6.2	Flytskjema av metodikken <i>halvering av antall nettstasjoner</i> med sekundærkriteriet <i>sannsynlighet for innkobling mot varige feil</i> for luftnett	31
6.3	Flytskjema av metodikken <i>halvering av lengde av radial</i> for luftnett	32
6.4	Flytskjema av metodikken <i>halvering av feilfrekvens</i> for luftnett	33
6.5	Flytskjema av metodikken <i>halvering av KILE-satser</i> for luftnett	34
6.6	Flytskjema av metodikken <i>halvering av forventet KILE</i> for luftnett	36
6.7	Flytskjema av metodikken <i>sekvensiell seksjonering</i> for luftnett	37
6.8	Flytskjema av metodikken <i>halvering av antall nettstasjoner</i> med sekundærkriteriet <i>nærmeste nettstasjon</i> for kabelnett	39
6.9	Flytskjema av metodikken <i>halvering av antall nettstasjoner</i> med sekundærkriteriet <i>sannsynlighet for innkobling mot varige feil</i> for kabelnett	40
6.10	Flytskjema av metodikken <i>halvering av lengde av radial</i> for kabelnett	41
6.11	Flytskjema av metodikken <i>halvering av feilfrekvens</i> for kabelnett	42
6.12	Flytskjema av metodikken <i>halvering av KILE-satser</i> for kabelnett	43
6.13	Flytskjema av metodikken <i>halvering av forventet KILE</i> for kabelnett	44
6.14	Flytskjema av metodikken <i>sekvensiell seksjonering</i> for kabelnett	45
7.1	Badekarkurve [38]	48
7.2	Feilstatistikk av elektriske komponenter grunnet fenomenet aldring [38]	49
8.1	Representasjon av luftnett-modell	50

---

8.2	Representasjon av kabelnett-modell . . . . .	52
8.3	Illustrasjon av luftnett-modell . . . . .	56
8.4	Eksempel på seksjoneringsforløp for <i>halvering av antall nettstasjoner</i> med sekundærkriteriet <i>nærmeste nettstasjon</i> i luftnett . . . . .	56
8.5	Illustrasjon av kabelnett-modell . . . . .	57
8.6	Eksempel på seksjoneringsforløp ved bruk av prøvekoblinger for <i>halvering av antall nettstasjoner</i> med sekundærkriteriet <i>nærmeste nettstasjon</i> i kabelnett . . . . .	57
8.7	Eksempel på seksjoneringsforløp ved bruk av megging for <i>halvering av antall nettstasjoner</i> med sekundærkriteriet <i>nærmeste nettstasjon</i> i kabelnett . . . . .	58
10.1	Gjennomsnittlig avbruddsvarighet per feil for luftnett-modell . . . . .	64
10.2	Årlig forventet avbruddsvarighet for luftnett-modell . . . . .	64
10.3	Gjennomsnittlig avbruddsvarighet per feil for prøvekoblinger i kabelnett-modell . . . . .	67
10.4	Årlig forventet avbruddsvarighet for prøvekoblinger i kabelnett-modell . . . . .	67
10.5	Gjennomsnittlig avbruddsvarighet per feil for isolasjonsmålinger i kabelnett-modell . . . . .	68
10.6	Årlig forventet avbruddsvarighet for isolasjonsmålinger i kabelnett-modell . . . . .	68
11.1	Skalering av lengde av kraftlinjer i luftnett-modell . . . . .	71
11.2	Skalering av lengde av kabelstrekninger i kabelnett-modell . . . . .	72
11.3	Skalering av feilfrekvens av kraftlinjer i luftnett-modell . . . . .	73
11.4	Skalering av feilfrekvens av kabelstrekninger i kabelnett-modell . . . . .	73
11.5	Gjennomsnittlig avbruddsvarighet per feil for prøvekoblinger i kabelnett-modell . . . . .	77
11.6	Årlig forventet avbruddsvarighet for prøvekoblinger i kabelnett-modell . . . . .	77
11.7	Gjennomsnittlig avbruddsvarighet per feil for isolasjonsmålinger i kabelnett-modell . . . . .	78
11.8	Årlig forventet avbruddsvarighet for isolasjonsmålinger i kabelnett-modell . . . . .	78
A1	Korreksjonsfaktorer for korrigerings av referansetidspunkt . . . . .	94
B2	Seksjoneringsforløp for <i>halvering av antall nettstasjoner</i> med sekundærkriteriet <i>nærmeste nettstasjon</i> i luftnett . . . . .	95
B3	Seksjoneringsforløp for <i>halvering av antall nettstasjoner</i> med sekundærkriteriet <i>sannsynlighet for innkobling mot varig feil</i> i luftnett . . . . .	95
B4	Seksjoneringsforløp for <i>halvering av lengde på radial</i> i luftnett . . . . .	96
B5	Seksjoneringsforløp for <i>halvering av KILE-satser</i> i luftnett . . . . .	96
B6	Seksjoneringsforløp for <i>sekvensiell seksjonering</i> i luftnett . . . . .	97
C7	Seksjoneringsforløp ved bruk av prøvekoblinger for <i>halvering av antall nettstasjoner</i> med sekundærkriteriet <i>nærmeste nettstasjon</i> i kabelnett . . . . .	98
C8	Seksjoneringsforløp ved bruk av prøvekoblinger for <i>halvering av antall nettstasjoner</i> med sekundærkriteriet <i>sannsynlighet for innkobling mot varig feil</i> i kabelnett . . . . .	98
C9	Seksjoneringsforløp ved megging for <i>halvering av antall nettstasjoner</i> med sekundærkriteriet <i>nærmeste nettstasjon</i> i kabelnett . . . . .	99
C10	Seksjoneringsforløp ved megging for <i>halvering av antall nettstasjoner</i> med sekundærkriteriet <i>sannsynlighet for innkobling mot varig feil</i> i kabelnett . . . . .	99
C11	Seksjoneringsforløp ved bruk av prøvekoblinger for <i>halvering av lengde på radial</i> i kabelnett . . . . .	100
C12	Seksjoneringsforløp ved megging for <i>halvering av lengde på radial</i> i kabelnett . . . . .	100
C13	Seksjoneringsforløp ved bruk av prøvekoblinger for <i>halvering av forventet KILE</i> i kabelnett . . . . .	101
C14	Seksjoneringsforløp ved megging for <i>halvering av forventet KILE</i> i kabelnett . . . . .	101
C15	Seksjoneringsforløp ved bruk av prøvekoblinger for <i>sekvensiell seksjonering</i> i kabelnett . . . . .	102
C16	Seksjoneringsforløp ved megging for <i>sekvensiell seksjonering</i> i kabelnett . . . . .	102

---

---

# Begrepsforklaring

Følgende liste inneholder begrepsforklaring av de viktigste uttrykkene benyttet i denne oppgaven. Definisjoner er stort sett hentet fra “*Definisjoner knyttet til feil og avbrudd i det elektriske kraftsystemet*” og “*IECs Electropedia*” [1] [2].

<b>Begrep</b>	<b>Definisjon</b>
Avbrudd	Tilstand karakterisert ved uteblitt eller redusert levering av elektrisk energi til én eller flere sluttbrukere, hvor forsynings- spenningen er under 1% av kontraktsmessig avtalt spenning
Blinking	Rask inn- og utkobling av effektbryter som følge av innkobling mot stående feil
DMS	Styringsystem for nettverksoperasjoner
Driftsforstyrrelse	Utløsning, påtvungen eller utilsiktet utkobling, eller mislykket innkobling som følge av feil i kraftsystemet
FASIT	Feil og avbruddsstatistikk i kraftforsyningen
Forbigående feil	Feil hvor korrigerende vedlikehold ikke er nødvendig
Leveringspunkt	Punkt i nettet der elektrisk energi utveksles
Megging	Isolasjonsmålinger i kabel, måling av ohmsk motstand
Nedstrøms	Motsatt retning av hovedforsyningen
Oppstrøms	Retning mot hovedforsyningen
SCADA-system	Driftskontrollsystem for styring og overvåking av strømmettet
Seksjoneringsmetode	Metode brukt til feilsøking under seksjonering
Seksjoneringsmetodikk	Logikk for valg av seksjoneringspunkter
Tilknytningspunkt	Punkt i overføringsnettet der det foregår innmating eller uttak av kraft eller utveksling mellom nettselskap
Tripping	Utfall
Utfall	Utløsning, påtvungen eller utilsiktet utkobling som medfører at en enhet ikke transporterer eller leverer elektrisk energi.
Utkobling	Manuell eller fjernstyrt bryterutkobling
Utløsning	Automatisk bryterfall eller sikringsbrudd
Varig feil	Feil hvor korrigerende vedlikehold er nødvendig

---

# Symbolliste

Symbol	Definisjon	Benevnelse
	<b><i>Ikke levert energi:</i></b>	
$k_{P,ref,i}$	Spesifikk avbruddskostnad for lastkategori $i$	$\left[ \frac{\text{NOK}}{\text{kW}} \right]$
$f_{K,P}$	Korreksjonsfaktor, ref.tidspunkt	$[-]$
$f_{K,t}$	Korreksjonsfaktor for time, $t$	$[-]$
$f_{K,d}$	Korreksjonsfaktor for dag, $d$	$[-]$
$f_{K,m}$	Korreksjonsfaktor for måned, $m$	$[-]$
$w$	Andel av belastning i leveringspunkt	$[-]$
$K_{avbrudd}$	Årlig forventet avbruddskostnad	$[\text{NOK}]$
	<b><i>Grunnleggende pålitelighetsteori:</i></b>	
$\lambda$	Feilfrekvens	$\left[ \frac{\text{Antall feil}}{\text{Total oppetid}} \right]$
$\mu$	Reparasjonsfrekvens	$\left[ \frac{\text{Antall feil}}{\text{Total nedetid}} \right]$
$m$	Funksjonstid	$\left[ \frac{\text{Total oppetid}}{\text{Antall feil}} \right]$
$r$	Reparasjonstid	$\left[ \frac{\text{Total nedetid}}{\text{Antall feil}} \right]$
$T$	Periode	$\left[ \frac{\text{Oppetid+Nedetid}}{\text{Antall feil}} \right]$
	<b><i>Pålitelighetsparametere:</i></b>	
$\lambda$	Antall avbrudd pr. år	$\left[ \frac{\text{Avbrudd}}{\text{år}} \right]$
$r$	Gjennomsnittlig avbruddsvarighet	$\left[ \frac{\text{Timer}}{\text{feil}} \right]$
$U_s$	Årlig avbruddsvarighet i system, $s$	$\left[ \frac{\text{Timer}}{\text{år}} \right]$
$\lambda_i$	Feilfrekvens for anleggsdel $i$	$\left[ \frac{\text{Feil}}{\text{år}} \right]$
$r_i$	Sum reparasjons-/koblingstid for komponent $i$	$[\text{Timer}]$
$N$	Antall sluttbrukere	$[-]$
$\Delta P_{avbrutt}$	Årlig avbrutt effekt i lastpunkt	$\left[ \frac{\text{kW}}{\text{år}} \right]$
$P_{midlere}$	Midlere belastning over året	$\left[ \frac{\text{kW}}{\text{år}} \right]$

---

Symbol	Definisjon	Benevnelse
	<b><i>Pålitelighetsindekser:</i></b>	
SAIFI	System Average Interruption Frequency Index	$\left[ \frac{\text{Antall kundeavbrudd}}{\text{Antall sluttbrukere år}} \right]$
CAIFI	Customer Average Interruption Frequency Index	$\left[ \frac{\text{Antall kundeavbrudd}}{\text{Antall berørte sluttbrukere år}} \right]$
SAIDI	System Average Interruption Duration Index	$\left[ \frac{\text{Avbruddsvarighet}}{\text{Antall sluttbrukere år}} \right]$
CAIDI	Customer Average Interruption Duration Index	$\left[ \frac{\text{Avbruddsvarighet}}{\text{Antall kundeavbrudd}} \right]$
ASAI	Average Service Availability Index	$[-]$
$P_{avbrutt}$	Årlig avbrutt effekt i lastpunkt	$\left[ \frac{\text{kW}}{\text{år}} \right]$
ILE	Ikke levert energi	$\left[ \frac{\text{kWh}}{\text{år}} \right]$
KILE	Kostnad for ikke levert energi	$\left[ \frac{\text{NOK}}{\text{år}} \right]$
	<b><i>Metodikk utarbeidet av SINTEF Energi:</i></b>	
$s$	Seksjoneringspunkt / bryter	$[-]$
$i$	Feilområde oppstrøms bryter $s$	$[-]$
$j$	Feilområde nedstrøms bryter $s$	$[-]$
$E(s)$	Forventningsverdi for KILE ved bryter $s$	$\left[ \frac{\text{NOK}}{\text{år}} \right]$
$\lambda_{i,j}^s$	Sum av feilsannsynlighet i område $i$ eller $j$	$[-]$
$k_{i,j}^s$	Sum av KILE for nettstasjoner i område $i$ eller $j$	$\left[ \frac{\text{NOK}}{\text{år}} \right]$

---



# 1 | Innledning

## 1.1 Beskrivelse av oppgave

I det norske distribusjonsnett er avbruddskostnader en stor økonomisk utfordring for nettselskaper da sluttbrukernes samfunnsøkonomiske kostnader ved avbrudd inkluderes i de bedriftsøkonomiske vurderingene. I feilsituasjoner seksjoneres distribusjonsnett for lokalisering og isolering av feil, samt gjenoppretting av forsyning til friske deler av strømmettet. Seksjoneringsmetodikkene og kriteriene de baserer seg på varierer derimot fra nettselskap til nettselskap, og siden det vanligvis ikke foreligger detaljerte prosedyrer for feilhåndtering kan også operatører innad i nettselskaper utføre seksjoneringen ulikt. KILE-kostnader og vurderinger av risiko- og kostnadsforbudet kriterier vil gi en indikasjon på hvilken seksjoneringsmetodikk som er optimal for gitt nettype og feiltype.

Delaktiviteter som ønskes adressert:

- Utvikle metode for pålitelighetsanalyser av luft- og kabelnett-modell
- Identifisere relevante inputparametere og risiko- og kostnadsforbudet kriterier ved seksjonering
- Drøft fordeler og ulemper med seksjoneringsmetodene og de definerte kriteriene
- Identifisere optimal seksjoneringsmetodikk for nettmodeller

Oppgaven er knyttet opp mot FoU-prosjektet *RAN-Robot for Automatisk Nettdrift* som er et samarbeidsprosjekt mellom BKK Nett og Powel AS. Rapporten er en enkeltstående oppgave som bygger videre på fordypningsprosjektet *Optimal investering i fjernstyring og overvåkning* utført høsten 2017 [3]. Grunnet likheter i videre arbeid har deler av den teoretiske bakgrunnen opphav fra fordypningsprosjektet. Enkelte avsnitt i kapittel 2, kapittel 3, kapittel 4 og kapittel 5 baserer seg på tidligere arbeid, men innehar likevel små endringer.

Hovedveileder : Kjell Sand

Medveiledere : Sjur Messel Nafstad og Line Bergfjord

---

## 1.2 Bakgrunn og formål

I Norge er nettvirksomheten et naturlig monopol, men reguleres av myndighetene for å sikre at strømmettet driftes, vedlikeholdes og utbygges på en sikker og samfunnsmessig optimal måte, samt at kraft overføres til riktig pris og leveringskvalitet [4]. Myndighetene regulerer nettselskapenes tillatte inntekt gjennom inntektsrammereguleringen. Reguleringsmodellen som benyttes til å fastsette dagens inntektsrammer bestemmes av faktiske kostnader og kostnadsnormer basert på sammenligningsanalyser av nettselskaper for evaluering av kostnadseffektiviteten til hvert enkelt selskap. I nettselskapenes kostnadsgrunnlag inngår de kvalitetsjusterte inntektsrammene ved ikke levert energi (KILE-ordningen) som representerer de totale samfunnsøkonomiske kostnadene som påføres sluttbrukere ved avbrudd. KILE-ordningen er innført for å gi nettselskaper økonomiske insentiver til riktig ressursallokering innenfor rammene og vilkårene til myndighetene. Nettselskapenes fremtidige inntektsmuligheter reduseres med andre ord dersom strømmettet ikke bygges og driftes med samfunnsøkonomisk optimal leveringspålitelighet [5].

Kostnader tilknyttet avbrudd i strømmettet er en stor økonomisk utfordring for mange nettselskaper. De gjennomsnittlige KILE-kostnadene i Norge utgjør omlag 800 MNOK/år, og de største kostnadene er tilknyttet distribusjonsnett. I 2011 utgjorde de totale KILE-kostnadene hele 1200 MNOK grunnet ekstremværet Dagmar [6]. Selv om strømmettet i Norge er robust, er det umulig å unngå avbrudd. En av mange måter å redusere kostnadene tilknyttet avbrudd i strømmettet er å seksjonere strømmettet optimalt ved bruk av riktig seksjoneringsmetode og seksjoneringsmetodikk for raskere lokalisering og isolering av feil.

## 1.3 Oppgavens struktur

Oppgaven tar først for seg generell teori om leveringspålitelighet og myndighetenes inntektsrammereguleringer for nettvirksomhet i Norge. Videre belyses grunnleggende teori om pålitelighetsanalyser med detaljerte beskrivelser av RELRAD-metoden.

I etterfølgende kapitler blir teori om høyspennings distribusjonsnett, avbruddshåndtering og risiko- og kostnadsforbundet kriterier for seksjonering lagt frem. Det er rettet stort fokus på hvordan nettselskaper seksjonerer strømmettet ved avbrudd for å lokalisere og isolere feil. Basert på teori og samtaler med driftspersonell i nettselskaper er det etablert flytskjema som detaljert beskriver benyttede seksjoneringsmetodikker.

Etablert metodikk for gjennomføring av pålitelighetsanalyser og vurderinger av optimal seksjoneringsmetodikk blir videre beskrevet sammen med oppbygging og forutsetninger for de to fiktive nettmodellene. Nettmodellene er utarbeidet i samarbeid med hovedveileder Kjell Sand og medveileder Line Bergfjord i BKK, og representerer høyspennings luft- og kabelnett.

Resultatene av pålitelighetsanalysene blir deretter presentert etterfulgt av en følsomhetsanalyse hvor parametere blir endret og skalert for å sjekke deres innvirkninger på resultatene. I vurderingene seksjoneringsmetodikkene blir de kvantifiserte pålitelighetsindeksene og KILE-besparelsene vurdert opp mot de ikke-kvantifiserte kriteriene redusert spenningskvalitet, aldring av komponenter og personsikkerhet.

Avslutningsvis inneholder oppgaven en oppsummerende diskusjon hvor optimal seksjoneringsmetodikk drøftes, samtidig som begrensninger og svakheter i resultater blir belyst. Til slutt blir konklusjoner og forslag til videre arbeid lagt frem.

## 2 | Leveringspålitelighet - kostnader ved avbrudd

På begynnelsen av 1990-tallet oppsto det store endringer i energisektoren da Energiloven ble innført, og Norges vassdrags- og energidirektorat(NVE) fikk det overordnede ansvaret for regulering av energiøkonomisering, monopol og -markedskontroll. Et fritt marked for handel av elektrisitet ble organisert ved at produksjon og omsetning av kraft ble konkurranseutsatt, mens krafttransport monopolbasert. Tidligere var Norge inndelt i lokale kraftmarkeder hvor energiverkene både var involverte i produksjon og distribusjon av strøm i nærområdet [7]. Formålet med Energiloven var å sikre at produksjon, omforming, overføring, omsetning, fordeling og bruk av energi ble håndtert på en samfunnsmessig rasjonell måte, hvor det tas hensyn til allmenne og private interesser [8]. Energiloven førte til et klart regnskapsmessig skille mellom produsenter og distributører ved at inntektsrammene til distributører blir regulert av NVE uavhengig av produsent i området. Liberaliseringen av elektrisitetsmarkedet stilte nye krav til distributører, angående opprettholdelse av samfunnsøkonomisk optimal leveringskvalitet, da forretningsområder som tidligere var gjenstand for konkurranse nå var monopolbasert. Leveringskvaliteten i et kraftsystem omfatter tilgjengeligheten av elektrisk energi, *leveringspålitelighet*, og anvendeligheten av den, *spenningskvalitet*. For å oppnå samfunnsøkonomisk optimal leveringskvalitet må investeringskostnader, drift- og vedlikeholdskostnader, tapskostnader, avbruddskostnader og flaskehalskostnader forbundet med forsyning av elektrisk energi minimeres [9].

### 2.1 Kvalitetsjusterte inntektsrammer for ikke levert energi

Den monopolbaserte nettvirksomheten ble ikke driftet med tilfredsstillende leveringspålitelighet, noe som førte til at inntektsrammereguleringen ble innført i 1997. Inntektsrammereguleringen hadde som formål å gi nettselskaper insentiver til kostnadseffektiv drift, ettersom avkastningen tilsvarte differansen mellom tillatte inntekter og faktiske kostnader [10]. I 2009 ble de kvalitetsjusterte inntektsrammene ved ikke levert energi (KILE-ordningen) innført som et supplement til reguleringen, med formål om å gi nettselskaper økonomiske insentiver til å utbygge, drifte og vedlikeholde strømmettet med samfunnsøkonomisk optimal leveringspålitelighet[5]. KILE-ordningen inngår i hvert enkelt nettselskaps kostnadsgrunnlag, og innebærer at nettselskapene får redusert sine fremtidige inntektsmuligheter på grunnlag av kundenes kostnader ved strømavbrudd. I starten gjaldt KILE-elementene avbrudd i høyspenningsnettet med varighet over tre minutter, men fra og med 2009 ble også kortvarige avbrudd inkludert [11].

Inntektsrammene oppdateres årlig ved at nettselskapenes egne regnskapstall inngår i beregningsgrunnlaget, samtidig som sammenlignende effektivitetsanalyser benyttes for avdekking av kostnadsnivåer for nettvirksomheten. Effektivitetsanalysene gir innsikt i nødvendige kostnader for effektiv drift, utnyttelse og utbygging av strømmettet. Hvert enkelt nettselskap vurderes opp mot hverandre ut fra selskapets totale kostnader tilknyttet utførelsen av forsyningsoppgaven. Det enkelte selskaps kostnadsnorm beregnes og defineres ut fra andre nettselskapers kostnader, såkalte frontselskaper [12]. Under fastsettelsen av nettselskapets

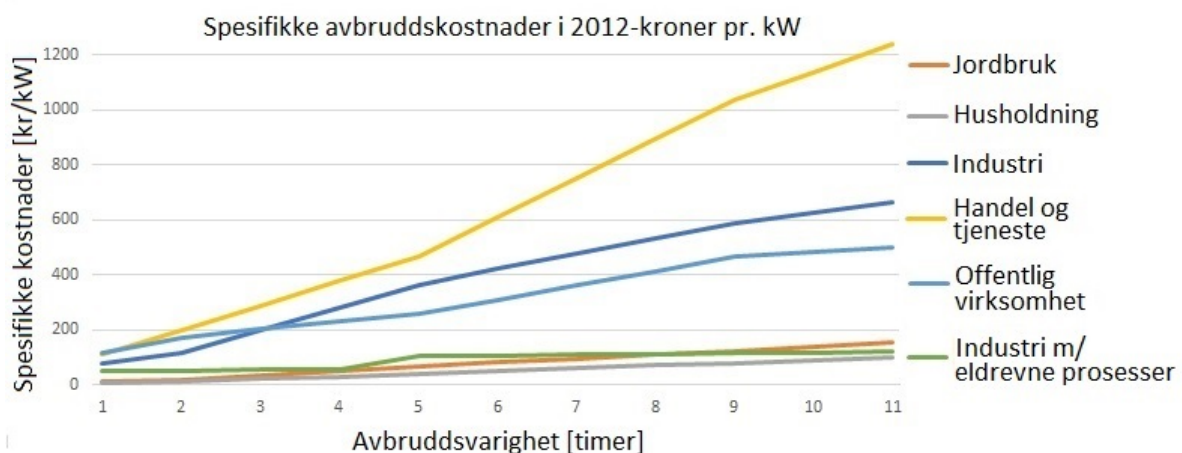
inntektsramme er kostnadsnormen vektet 60%, mens nettselskapets virkelige kostnader 40%. Det vil si at nettselskapene uansett får dekket 40% av kostnadene sine, mens de resterende 60% er avhengig av hvor effektivt nettselskapet er. Opprettholdelse av høy leveringspålidelighet er med andre ord svært viktig for nettselskaper da det påvirker netteiers økonomi direkte [13].

Grunnet ulikheter i brukstid, forbruksnivå og konsekvenser ved utfall deles sluttbrukerne i den norske reguleringen inn i seks ulike kundegrupper, jordbruk, husholdning, industri, handel og tjeneste, offentlig virksomhet og industri med eldrevne prosesser. Hver av kundegruppene har forskjellige kostnadsfunksjoner som benyttes til å beregne spesifikk avbruddskostnader( $k_{P,ref}$ ). Kostnadsfunksjonene reflekterer kundens tidsavhengige kostnader som følge av avbruddet, og er et uttrykk for de totale samfunnsøkonomiske kostnadene som påføres sluttbrukerne. Tabell 2.1 viser kostnadsfunksjonene angitt i 2012-kroner pr. kW avbrutt effekt for avbruddsvarigheter( $r$ ) gitt i timer. Elementene i kostnadsfunksjonene baserer seg på en landsomfattende spørreundersøkelse utført i 2012 [14].

Kunde- gruppe	Kostnadsfunksjoner for beregning av spesifikk avbruddskostnader				
	$r < 1 \text{ min}$	$1 \text{ min} \leq r < 1 \text{ t}$	$1 \text{ t} \leq r < 4 \text{ t}$	$4 \text{ t} \leq r < 8 \text{ t}$	$r \geq 8 \text{ t}$
Jordbruk	$14,3 \cdot r + 5$	$14,3 \cdot r + 5$	$15,6 \cdot r + 3,4$	$14,3 \cdot r + 8,8$	$14,3 \cdot r + 8,8$
Husholdning	$9,8 \cdot r + 1,1$	$9,8 \cdot r + 1,1$	$9,8 \cdot r + 1,1$	$9,8 \cdot r + 1,1$	$9,8 \cdot r + 1,1$
Industri	34	$84,7 \cdot r + 34$	$82,3 \cdot r + 35,7$	$55,6 \cdot r + 142,6$	$36,5 \cdot r + 296$
Handel og tjenester	16	$168,3 \cdot r + 28$	$91,1 \cdot r + 104,9$	$141,3 \cdot r - 96,2$	$102,4 \cdot r + 214,8$
Offentlig virksomhet	7	$113,2 \cdot r + 60$	$27,9 \cdot r + 145,1$	$51,8 \cdot r + 49,8$	$17,6 \cdot r + 323,2$
Industri (eldreven)	$2,8 \cdot r + 49$	$2,8 \cdot r + 49$	$2,8 \cdot r + 49$	$2,8 \cdot r + 91$	$2,8 \cdot r + 91$

**Tabell 2.1:** Spesifikke avbruddskostnader for ikke-varslet avbrudd på ref.tidspunkt [3]

For å bedre illustrere hvilke sluttbrukere som påfører de største avbruddskostnadene er kostnadsfunksjonene fra tabell 2.1 plottet som funksjon av avbruddsvarigheten, se figur 2.1. Figuren viser at det er kundegruppen *handel og tjeneste* som har de største spesifikke avbruddskostnadene for alle avbruddsvarigheter, mens *husholdning*, *industri med eldrevne prosesser* og *jordbruk* lavest.



**Figur 2.1:** Spesifikke avbruddskostnader i 2012-kroner pr. kW [15]

De spesifikke avbruddskostnadene fra kostnadsfunksjonene er referert til timen i året med høyest last for alle kundegrupper. Referansetidspunktet for kundegruppene er gitt i tabell 2.2.

Kundegruppe	Referansetidspunkt
Jordbruk	Torsdag i januar kl. 06 : 00
Husholdning	Hverdag i januar kl. 16 : 00
Industri	Hverdag i januar kl. 10 : 00
Handel og tjeneste	Hverdag i januar kl. 10 : 00
Offentlig virksomhet	Torsdag i januar kl. 10 : 00
Kraftintensiv industri	Hverdag i januar kl. 10 : 00

**Tabell 2.2:** Referansetidspunkt for kundegrupper [3]

I og med at belastningen er tidsavhengig vil også avbruddskostnadene være det. For å ta hensyn til avbruddstidspunktet kan de spesifikke avbruddskostnadene korrigeres med korreksjonsfaktorer for klokkeslett, ukedag og måned. Likning 2.1 viser hvordan de spesifikke avbruddskostnadene korrigeres med relative korreksjonsfaktorer for månedlige-, daglige- og timesbaserte variasjoner. Korreksjonsfaktorene for de forskjellige kundegruppene er gitt i vedlegg A [15].

$$f_{K,P} = f_{K,t} \cdot f_{K,d} \cdot f_{K,m} \quad (2.1)$$

- $f_{K,t}$  - Korreksjonsfaktor for avbruddskostnad i time,  $t$
- $f_{K,d}$  - Korreksjonsfaktor for avbruddskostnad på dag,  $d$
- $f_{K,m}$  - Korreksjonsfaktor for avbruddskostnad i måned,  $m$

I tilfeller hvor et lastpunkt består av sluttbrukere fra flere forskjellige kundegrupper må disse vektlegges ved beregning av spesifikke avbruddskostnader. Det er vanlig å vektlegge kostnadene individuelt for hver kategori etter andel av belastningen i et gitt lastpunkt. Gjennomsnittlig spesifikk avbruddskostnad for tilknytningspunktet på referansetidspunktet kan beregnes ved hjelp av likning 2.2 [14].

$$K_{P,ref,res} = \sum_{i=1}^n K_{P,ref,i} \cdot w_j \quad (2.2)$$

- $K_{P,ref,res}$  - Resulterende spesifikk kostnad i tilknytningspunkt på referansetidspunkt
- $K_{P,ref,i}$  - Spesifikk avbruddskostnad på referansetidspunkt for lastkategori  $i$
- $w_j$  - Vektet andel av belastning i rapporteringsspunkt  $j$
- $n$  - Antall lastkategorier tilknyttet leveringspunkt

---

De totale samfunnsøkonomiske kostnadene ved avbrudd blir ofte delt i to kategorier, netto private sluttbrukerkostnader og netto kostnader for resten av samfunnet. Disse to kategoriene består igjen av direkte- og indirekte kostnader. De direkte kostnadene kommer som følge av ødelagt utstyr, tapt produksjon og driftskostnader for å gjenopprette systemet, mens de indirekte kostnadene er kostnader som varer over en lengre tidsperiode uten direkte sammenheng med avbruddet eller hendelsen [3]. De forventede årlige avbruddskostnadene som påløper nettselskaper for å ikke ivareta samfunnsøkonomisk optimal leveringspålitelighet kan estimeres ved hjelp av likning 2.3. Likning 2.3 forutsetter at hele effekten i rapporteringspunktet kobles ut. I tilfeller hvor det er mulig å forsyne deler av belastningen kan likning 2.4 benyttes [16].

$$K_{avbrudd} = \sum_i \lambda \cdot P_{ref} \cdot k_{P,ref}(r) \cdot f_{K,P} \quad (2.3)$$

$$K_{avbrudd} = f_{K,P} \cdot \frac{P_{ref}}{P_{mildere}} \cdot \sum_i \lambda_i \cdot P_{avbrutt,i} \cdot k_{P,ref}(r_i) \quad (2.4)$$

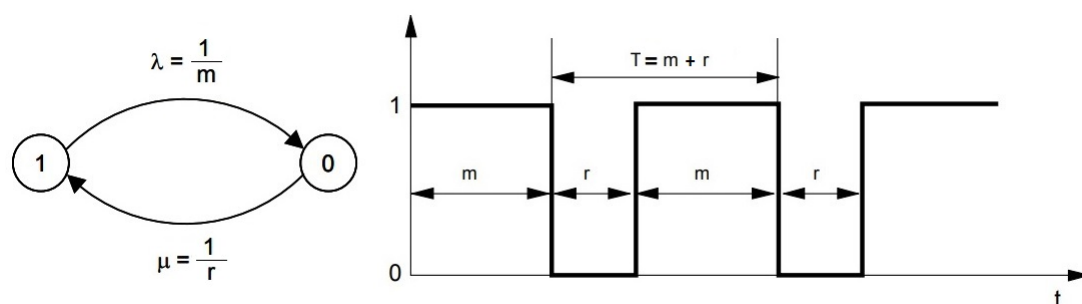
- $\lambda$  - Gjennomsnittlig antall avbrudd pr. år for rapporteringspunktet
- $P_{mildere}$  - Gjennomsnittlig belastning over året
- $P_{ref}$  - Belastning i belastningspunktet på referansetidspunktet
- $P_{avbrutt,i}$  - Avbrutt effekt ved feil i anleggsdel,  $i$
- $k_{P,ref}(r)$  - Spesifikk avbruddskostnad på referansetidspunktet for avbruddsvarighet  $r$
- $f_{K,P}$  - Korreksjonsfaktor for årlig gjennomsnittlig spesifikk avbruddskostnad

## 3 | Pålitelighetsanalyse

Pålitelighetsanalyser benyttes til å kvantifisere usikkerheten i et system. Påliteligheten blir vurdert opp mot spesifikke kriterier for hva som er akseptabel og ikke-akseptabel tilstand for et system eller en enkeltkomponent. For å evaluere leveringspåliteligheten i kraftsystemer benyttes pålitelighetsanalyser, hvor kraftsystemets eller en enkeltkomponents evne til å utføre sin tiltenkte funksjon vurderes. I kombinasjon med sluttbruker og netteiers kostnader tilknyttet avbrudd blir slike analyser benyttet til å vurdere de totale forventede avbruddskostnadene for et gitt pålitelighetsnivå. Ofte er pålitelighetsanalyser brukt i forbindelse med drift- og vedlikeholdsplanlegging, kraftsystem- og beredskapsplanlegging, prosjekteringer av nye anlegg, re-investering og konsekvensutredning. I denne oppgaven benyttes teori om pålitelighetsanalyser til å evaluere påliteligheten i nettmodeller for ulike seksjoneringsmetodikker. Deler av dette kapittelet baserer seg på tidligere arbeid [3].

### 3.1 Grunnleggende teori for distribusjonsnett

Matematikeren Andrey A. Markov utviklet på begynnelsen av 1900-tallet en stokastisk prosess som senere er mye brukt innenfor kvantitative pålitelighetsanalyser. Metodikken benyttes til å utføre enkle beregninger av påliteligheten i radiale distribusjonsnett, med utgangspunkt i de enkelte komponentene [3]. Teorien baserer seg på tilstandssyklusen av komponenter, se figur 3.1. For å beskrive tilstanden til komponenter benyttes binære tall, hvor *tilstand 0* tilsier at komponenten er inaktiv, mens *tilstand 1* at komponenten er aktiv. Reparasjonstiden( $r$ ) er tiden en komponent er inaktiv, og funksjonstiden( $m$ ) er tiden den er operativ. Summen av disse utgjør perioden( $T$ ). Feilfrekvensen( $\lambda$ ) og reparasjonsfrekvensen( $\mu$ ) er definert som invers av henholdsvis reparasjons- og funksjonstiden, se figur 3.1. Både feilfrekvensen og reparasjonstiden til ulike komponenter hentes fra relevant statistikkunderlag [9].

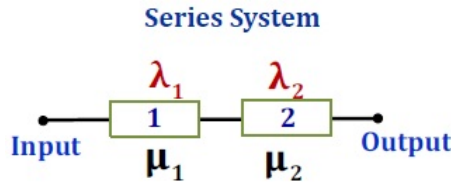


Figur 3.1: Tilstandssyklus for enkeltkomponent [17]

---

### 3.1.1 Seriestruktur

Til å beskrive påliteligheten i strømmettet benyttes pålitelighetsindekser som representerer årlige forventningsverdier. De tre generelle pålitelighetsindeksene som benyttes i pålitelighetsanalyser er avbruddsfrekvens( $\lambda$ ), gjennomsnittlig avbruddsvarighet( $r$ ) og årlig avbruddsvarighet ( $U$ ). I seriekoblet system, se figur 3.2, kan pålitelighetsindeksene beregnes ved hjelp av likning 3.1 - likning 3.3 [17]. Selv om distribusjonsnett ofte er utformet som et maskenett driftes det radielt ved hjelp av brytere i åpen posisjon. For pålitelighetsberegninger av distribusjonsnett er derfor seriestruktur gjeldende.



**Figur 3.2:** Illustrasjon av seriestruktur for pålitelighetsberegninger [18]

$$\lambda = \sum_i \lambda_i \quad (3.1)$$

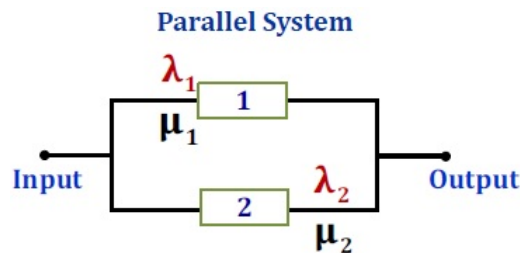
$$U = \sum_i \lambda_i \cdot r_i \quad (3.2)$$

$$r = \frac{U}{\lambda} = \frac{\sum_i \lambda_i \cdot r_i}{\sum_i \lambda_i} \quad (3.3)$$

- $i$  - Tellevariabel for antall anleggsdeler
- $\lambda_i$  - Feilfrekvens for anleggsdel  $i$
- $r_i$  - Reparasjonstid og/eller koblingstid for anleggsdel  $i$

### 3.1.2 Parallelstruktur

I nettsystemer bestående av parallellkoblede komponenter, se figur 3.3, kan ikke teorien om seriestruktur anvendes. For beregning av pålitelighetsindeksene i masket nett eller parallellkoblede kretser benyttes likning 3.4 - likning 3.6.



**Figur 3.3:** Illustrasjon av parallelstruktur for pålitelighetsberegninger [18]

$$\lambda = \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot (r_1 + r_2) \quad (3.4)$$

$$r = \frac{r_1 \cdot r_2}{r_1 + r_2} \quad (3.5)$$

$$U = \lambda \cdot r \quad (3.6)$$



---

## 3.2 Pålitelighetsindekser

De tre generelle pålitelighetsindeksene er fundamentale, men gir ikke alltid en komplett representasjon av nettsystemets leveringspålitelighet. Grunnen til dette er at de ikke er deterministiske verdier, og representerer kun forventede langsiktige gjennomsnittsverdier basert på en underliggende sannsynlighetsfordeling. Pålitelighetsindeksene tar for eksempel ikke høyde for om gjennomsnittslasten i lastpunktet er 100kW eller 10MW, eller om det er en kunde eller to hundre kunder som er tilkoblet lastpunktet. For å evaluere betydningen av avbrudd benyttes derfor flere pålitelighetsindekser, som gir et mer komplett bilde av situasjonen. En skiller ofte mellom kundeorienterte og last- og energiorienterte pålitelighetsindekser [3].

### 3.2.1 Kundeorienterte pålitelighetsindekser

#### System- and Customer Average Interruption Frequency Index, SAIFI / CAIFI

Pålitelighetsindeksene viser hvor frekvent feil oppstår i et nettsystem eller hos en sluttbruker. Forskjellen på SAIFI og CAIFI er at sistnevnte kun inkluderer påvirkede kunder. De berørte kundene blir kun registrert for et avbrudd, uavhengig av hvor mange feil som har oppstått i løpet av et år. CAIFI benyttes spesielt for å sammenligne påliteligheten for ulike kalenderår, da ikke alle kunder behøver å bli berørt av et avbrudd. Indeksene kan både benyttes for å beregne historiske- og fremtidige hendelser. Likning 3.7 og likning 3.8 benyttes til å beregne SAIFI og CAIFI [3] [17].

$$SAIFI = \frac{\text{Totalt antall kundeavbrudd}}{\text{Totalt antall kunder}} = \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot N_i}{\sum_{i=1}^{ntot} N_i} \left[ \frac{\text{Antall kundeavbrudd}}{\text{Sluttbrukere år}} \right] \quad (3.7)$$

$$CAIFI = \frac{\text{Totalt antall kundeavbrudd}}{\text{Totalt antall berørte kunder}} = \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot N_i}{\sum_{i=1}^n N_i} \left[ \frac{\text{Antall kundeavbrudd}}{\text{Berørte sluttbrukere år}} \right] \quad (3.8)$$

#### System- and Customer Average Interruption Duration Index, SAIDI / CAIDI

Pålitelighetsindeksene sier noe om varigheten av avbruddene i et nettsystem og til påvirkede sluttbrukere. Indeksene kan både benyttes for å beregne historiske- og fremtidige hendelser. Likning 3.9 og likning 3.10 benyttes for å regne SAIDI og CAIDI [17].

$$SAIDI = \frac{\text{Sum av varighet av kundeavbrudd}}{\text{Totalt antall kunder}} = \frac{\sum_{i=1}^n U_i \cdot N_i}{\sum_{i=1}^{ntot} N_i} \left[ \frac{\text{Timer}}{\text{Sluttbrukere år}} \right] \quad (3.9)$$

$$CAIDI = \frac{\text{Sum av varighet av kundeavbrudd}}{\text{Totalt antall kunderavbrudd}} = \frac{\sum_{i=1}^n U_i \cdot N_i}{\sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot N_i} \left[ \frac{\text{Timer}}{\text{Antall kunderavbrudd}} \right] \quad (3.10)$$

### Average Service Availability Index, ASAI

Pålitelighetsindeksen ASAI er et mål på tilgjengelighet, og kan både anvendes for å beregne historiske- og fremtidige hendelser. Indeksen tilsvare sannsynligheten for at et nettsystem- eller sluttbrukere er i tilgjengelig tjeneste. ASAI har en tallverdi mellom 0 og 1, og kan beregnes ved hjelp av likning 3.11 [17].

$$ASAI = \frac{\text{Antall kundetimer med tilgjengelig tjeneste}}{\text{Antall ønskede kundetimer}} = \frac{8760 \cdot \sum_{i=1}^{n_{tot}} N_i - \sum_{i=1}^n U_i \cdot N_i}{8760 \cdot \sum_{i=1}^{n_{tot}} N_i} \quad [-] \quad (3.11)$$

### 3.2.2 Last- og energiorienterte pålitelighetsindekser

#### Årlig avbrutt effekt

Årlig avbrutt effekt tilsvare effekten som ikke blir levert til sluttbrukere grunnet avbrudd. Årlig avbrutt effekt kan beregnes ved hjelp av likning 3.12 [18].

$$\Delta P_{avbrutt} = P_{midlere} \cdot \sum_i \lambda_i \quad \left[ \frac{\text{kW}}{\text{år}} \right] \quad (3.12)$$

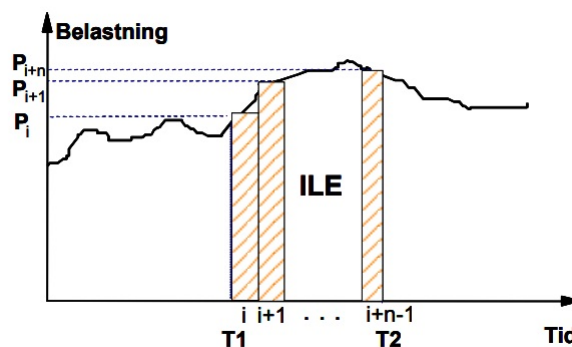
- $\Delta P_{avbrutt}$  - Årlig avbrutt effekt for lastpunkt
- $P_{midlere}$  - Midlere belastning over året
- $\lambda_i$  - Feilfrekvens for anleggsdel  $i$

#### Ikke levert energi, ILE

Levering av elektrisk energi til sluttbruker som uteblir regnes som ikke levert energi (ILE). ILE oppstår ved avbrudd i strømmettet, og kan være forårsaket av feil, driftsforstyrrelser eller reduksjon i levering grunnet manglende kapasitet. For hvert avbrudd beregnes ILE basert på integralet under lastkurven når belastningen er større enn tilgjengelig leveringskapasitet, se figur 3.4. Årlig forventet ILE kan beregnes ut fra midlere belastning over året, se likning 3.13 [9] [18].

$$ILE = P_{midlere} \cdot \sum_i \lambda_i \cdot r_i \quad \left[ \frac{\text{kWh}}{\text{år}} \right] \quad (3.13)$$

- $P_{midlere}$  - Midlere belastning over året
- $\lambda_i$  - Feilfrekvens for anleggsdel  $i$
- $r_i$  - Reparasjonstid og/eller koblingstid for anleggsdel  $i$



Figur 3.4: Illustrasjon av ikke levert energi for radialnett [9]

---

### 3.3 RELRAD-metoden

Et radielt strømnett er sammensatt av mange seriekoblede komponenter, blant annet kraftledninger, effektbrytere, skillebrytere, lastbrytere, transformatorer og generatorer. Siden komponentene er seriekoblet vil en driftsforstyrrelse medføre at alle leveringspunkter nedstrøms utløst effektbryter vil bli utkoblet. Kartlegging av konsekvenser tilknyttet driftsforstyrrelser fra produksjon til sluttbrukere er derfor svært viktig [3]. RELRAD-metoden er en velkjent metodikk utviklet av SINTEF for pålitelighetsanalyser av radielle strømnett. Tilnærmingen av denne metoden er å finne hvilke lastpunkter som blir berørt når en gitt komponent svikter. Denne vinklingen skiller seg fra den klassiske-metoden, hvor en ser på hvilken komponenter som kan ha forårsaket avbrudd i et gitt lastpunkt, se figur 3.5. RELRAD-metoden benytter også radvis tabellform og ikke kolonnevis tabellform slik som den klassiske-metoden, noe som gir færre kalkulasjoner om det inngår flere lastpunkter. RELRAD-metoden baserer seg på følgende forutsetninger [19].

#### Topografiske forutsetninger

- Kraftnettet må ha radiell struktur
- Feil isoleres av nærmeste oppstrøms effektbryter
- Når feil er lokalisert vil oppstrøms last-/skillebryter åpne og effektbryter lukkes

#### Statistiske forutsetninger

- Alle feil antas statistisk uavhengige
- Alle feil antas reparert før neste inntreffer
- Samtidighet er ikke representert (kan representeres ved parallelle forbindelser)
- Reserveforbindelser er tilgjengelig ved behov

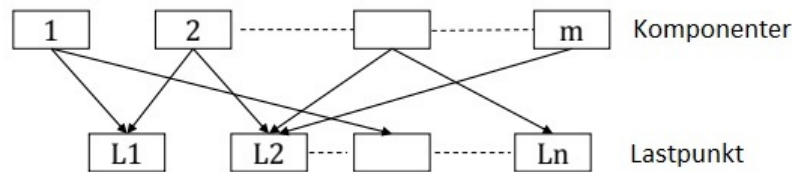
#### Minimale kutt for lastpunkt $L_1$

Forsyningspunkt



Hvilke komponenter gir avbrudd til lastpunkt

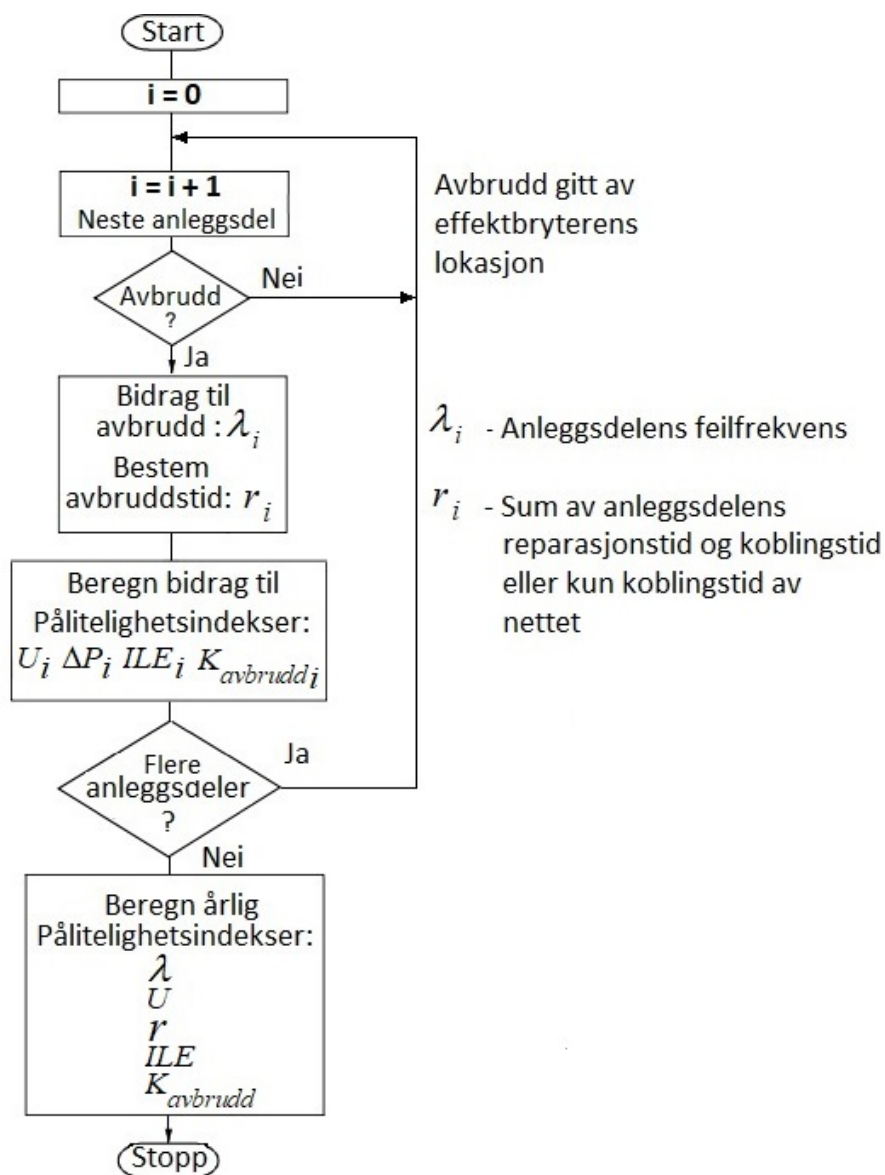
#### RELRAD-metodikk



Hvilke lastpunkt vil oppnå avbrudd forårsaket av en bestemt komponent

Figur 3.5: Illustrasjon av den klassiske metoden vs RELRAD-metoden [19]

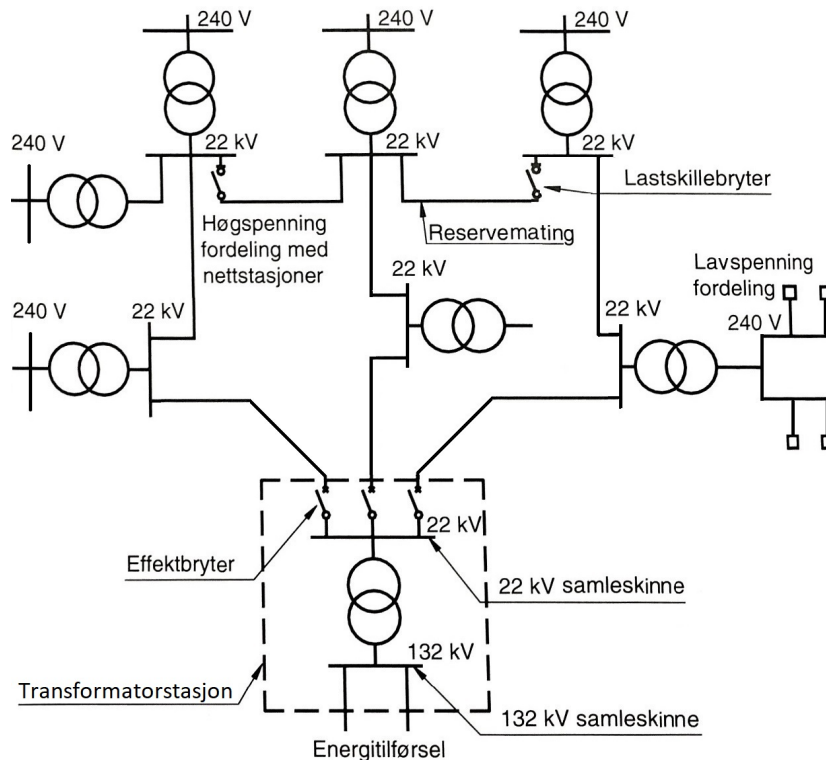
I forkant av pålitelighetsanalyser er det nødvendig å innhente statistisk data for komponenter i strømmettet. Dette innebærer informasjon angående avbruddsfrekvens, reparasjonstider og seksjoneringstider. Det er også nødvendig å utforme seksjoneringsmetodikken som beskriver relasjonene mellom feilbefengt komponent og avbruddsvarigheter ved lastpunkter. Avbruddsvarigheter i lastpunkter beregnes ut fra plasseringen av brytere i strømmettet. Enkelte lastpunkter gjenoppretter strømforsyningen etter en gitt koblingstid, mens andre lastpunkter gjenoppretter ikke strømforsyningen før feilbefengt komponent er reparert [3]. Algoritmen i RELRAD-metoden ser først på hvilke komponenter som fører til avbrudd. Deretter akkumuleres pålitelighetsindekser for hver komponent som gir avbrudd i et gitt lastpunkt. Når alle komponenters bidrag til pålitelighetsindekser for alle lastpunkter er beregnet, kan de årlige pålitelighetsindeksene akkumuleres. Figur 3.6 illustrerer metodikken ved bruk av RELRAD-metoden [19].



Figur 3.6: Flytskjema for RELRAD-metodikken [19]

## 4 | Høyspennings distribusjonsnett

Distribusjonsnettets er delt inn i høyspennings- og lavspennings distribusjonsnett, og er den delen av strømmettet som transporterer kraft fra regionalnettet og frem til sluttbrukerne. Det høyspente distribusjonsnettets transformerer spenningen ned fra regionalnettsnivå, og transporterer strømmen frem til nettstasjoner med spenninger mellom 1 - 22 kV. I nettstasjonene blir spenningen transformert ned til 230 - 400 V, og videre distribuert til sluttbrukerne via det lavspente distribusjonsnettets. Distribusjonsnettets er utformet som et radielt strømmett eller som et maskenett som driftes radielt ved hjelp av brytere i åpen posisjon. At strømmettet er radielt betyr at avganger/radialer forsynes fra en bestemt retning. Radialen i et høyspent distribusjonsnett forsynes fra en transformatorstasjon, og videre distribueres strømmen til nettstasjoner via et komplekst nettverk bestående av mange avgreninger. Langs hovedradialen eller i avgreninger er det ofte plassert skille-, lastskille- eller effektbrytere for å effektivt kunne dele opp nettet under feilsituasjoner, slik at forsyningen kan gjenopprettes til flest mulig via alternative forsyningsveier. Ulempen med radiell struktur er at feil medfører utkobling av alle lastpunkter nedstrøms utkoblet effektbryter, og dersom alternative forsyningsveier ikke er tilgjengelig vil ikke alle kunder få gjenopprettet forsyningen før feil er isolert og reparert. I tilfeller hvor det høyspente distribusjonsnettets er utformet som et maskenett kan reservemating tilkobles etter at feil er isolert, og forsyne friske deler av strømmettet. Den prinsipielle oppbyggingen av det høyspente distribusjonsnettets er vist i figur 4.1 [20].



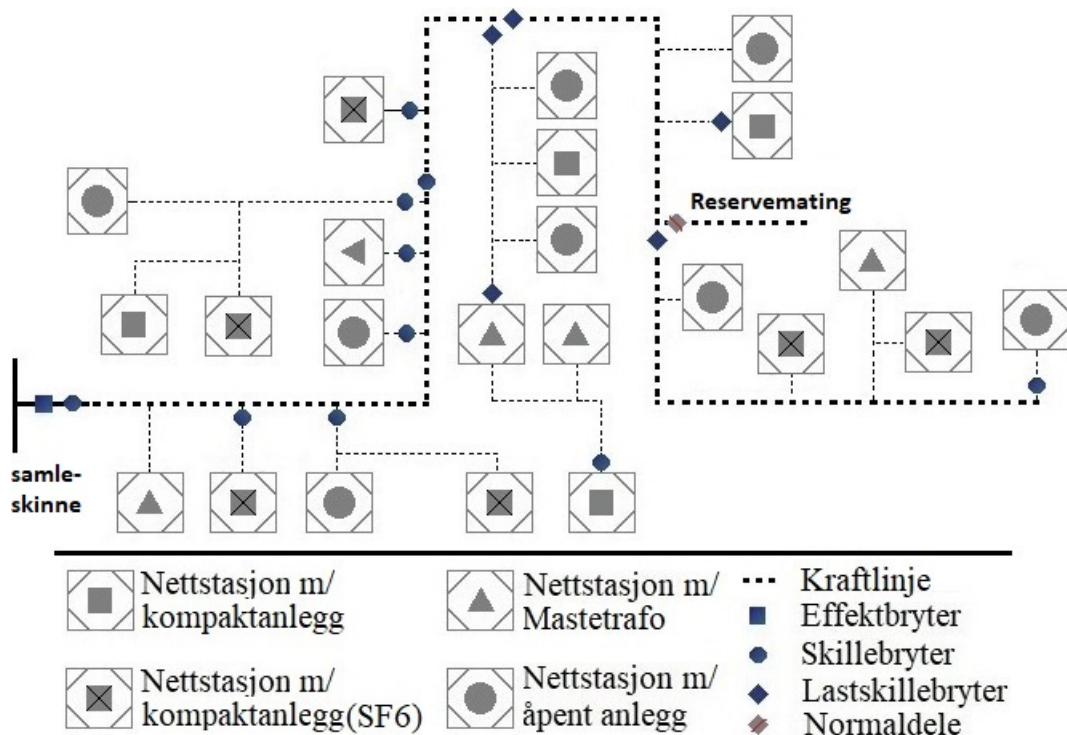
Figur 4.1: Prinsipiell illustrasjon av høyspennings fordelingsnett med nettstasjoner [20]

## 4.1 Nettyper

Det høyspente distribusjonsnett kan bestå av luftnett, kabelnett eller blandet nett. Følgende delkapittel omhandler den generelle oppbyggingen av luft-, kabel- og blandet nett med fokus på bruksområde og prinsipiell struktur.

### 4.1.1 Luftnett

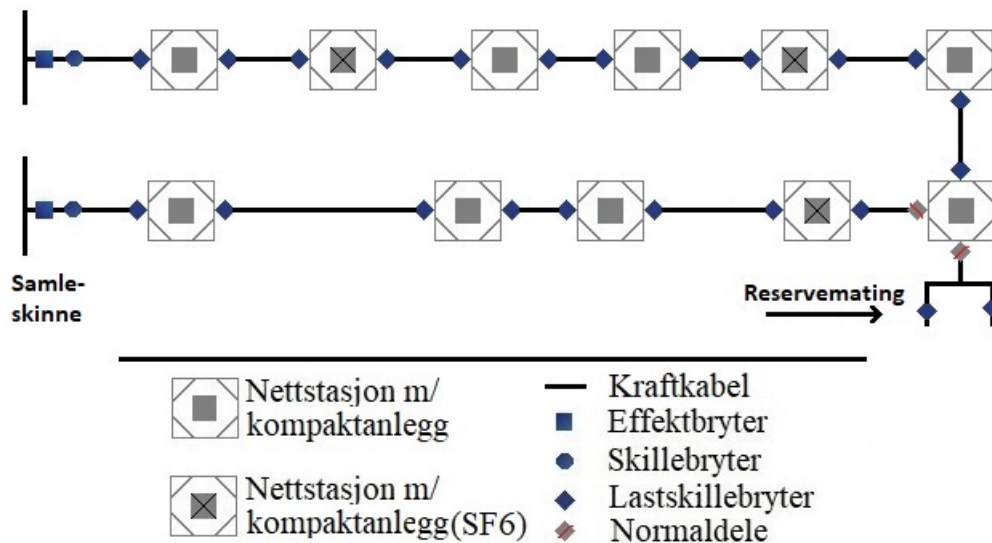
I distriktet består det høyspente distribusjonsnett som regel av langstrakte 22 kV kraftlinjer som bæres av mastekonstruksjoner. Luftnettet er vanligvis utformet som en lang radial med mange avgreninger som forsyner nettstasjoner hvor sluttbrukerne er tilkoblet. Nettstasjonene kan være mastemonterte nettstasjoner, åpne anlegg eller kompakte anlegg. Utstrekningen av luftnett varierer typisk mellom 10 - 30 km, og hver radial kan ha så mye som 30 nettstasjoner tilkoblet [21] [22] [23]. Rundt om i luftnettet er det plassert brytere for å kunne seksjonere nettet ved feilsituasjoner. Antall og type brytere er avhengig av topologi og belastninger, og er ofte historisk betinget. Plassering og antall brytere er derfor ikke nødvendigvis optimalt i forhold til hvordan strømmettet driftes den dag i dag. Figur 4.2 viser oppbyggingen av et typisk 22 kV luftnett med tilkoblede nettstasjoner, muligheter for reservemating og plassering av skille- og lastskillebrytere. Fra figur 4.2 kan en se at det er relativt få brytere i nettet som kan benyttes i seksjoneringen for å lokalisere og isolere feil. Dette fører til at det ofte er flere nettstasjoner som mister forsyningen under feilsituasjoner, og forsyningen gjenopprettes ikke før feil er reparert.



Figur 4.2: Illustrasjon av prinsipiell oppbygging av høyspennings luftnett [21]

### 4.1.2 Kabelnett

I byer og tettbygde strøk benyttes som regel nedgravde kraftkabler med spenning mellom 1 - 22 kV. Oppbyggingen av kabelnett skiller seg fra luftnett ved at hver kabelstrekning er sammenkoblet ved hjelp av nettstasjoner med koblingsmuligheter. I tillegg er kabelnett i større grad utformet som masket strømnnett med muligheter for innkobling av reservemating. Brytemulighetene i nettstasjonene og tilgang til reservemating gjør det som regel mulig å isolere feilbefengt kabelstrekning og forsyne alle nettstasjoner selv om feil fremdeles ikke er reparert. Den prinsipielle oppbyggingen er illustrert i figur 4.3. Figuren viser at det er plassert adskillig flere brytere i strømnettet, noe som gjør at feilbefengt seksjon i de fleste tilfeller vil være mye mindre i kabelnett enn for luftnett.



Figur 4.3: Illustrasjon av prinsipiell oppbygging av høyspennings kabelnett [21]

### 4.1.3 Blandet nett

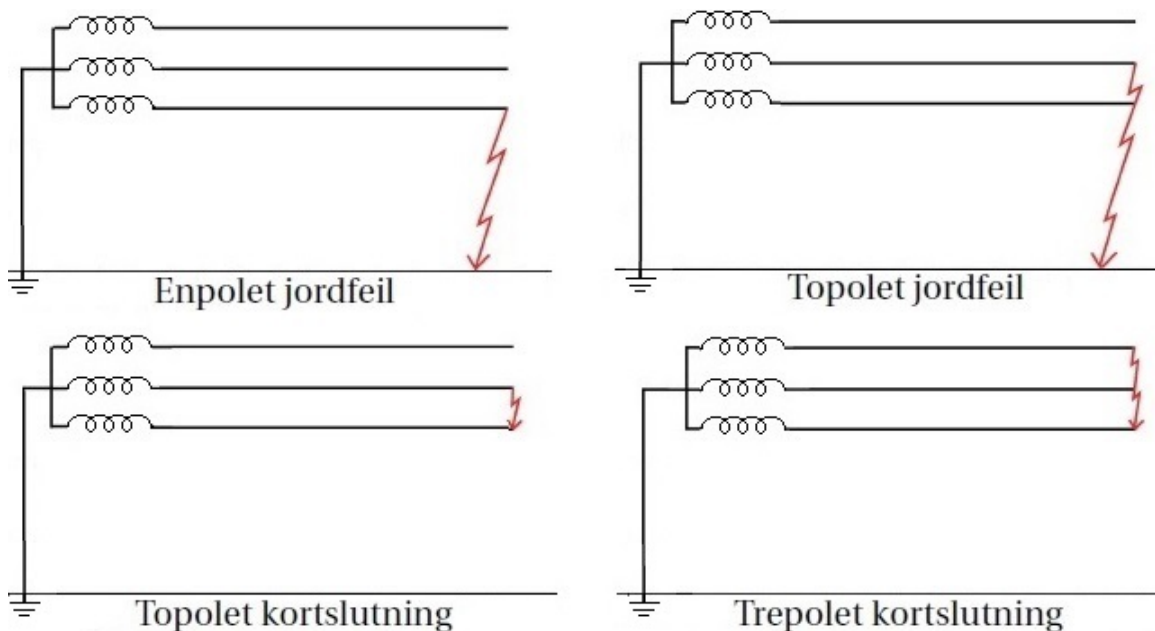
Den største andelen av strømnnett i det høyspente distribusjonsnettet er såkalt blandet nett. Et blandet nett er en kombinasjon av luftnett og kabelnett, hvor nettet består av mindre enn 90% av hver av nettypene. Blandet nett benyttes både i nærheten av tettbygde strøk og i distriktet.

---

## 4.2 Feiltyper

Feil i strømmettet vil si at en komponent har manglende eller nedsatt evne til å utføre sin funksjon, noe som ofte er utløsende årsak til driftsforstyrrelser. En elektrisk kortslutning oppstår når isolasjonsmaterialet mellom to spenningsførende deler bryter sammen, og danner en lav impedans vei hvor store strømmene kan flyte. De unormale strømmene ved kortslutning kan medføre store ødeleggelser av komponenter, samt føre til lang- eller kortvarige avbrudd i strømmettet [3].

I et trefase kraftsystem kan det oppstå flere forskjellige typer feil mellom faser og jord, ofte skiller en mellom symmetriske- og usymmetriske feil. Symmetriske feil, også kalt en trefase kortslutning oppstår når alle fasene i et trefase kraftsystem kortsluttes. Trefase kortslutning er en symmetrisk feil da alle fasene påvirkes likt. Usymmetriske feil oppstår når en eller flere av fasene kortsluttes mot jord eller andre faser. Fasestrømmer og fasespenninger vil under slike betingelser være usymmetriske. Eksempler på usymmetriske feil er enfase og tofase jord- og kortslutning. Figur 4.4 illustrerer de vanligste feiltypene. [20]

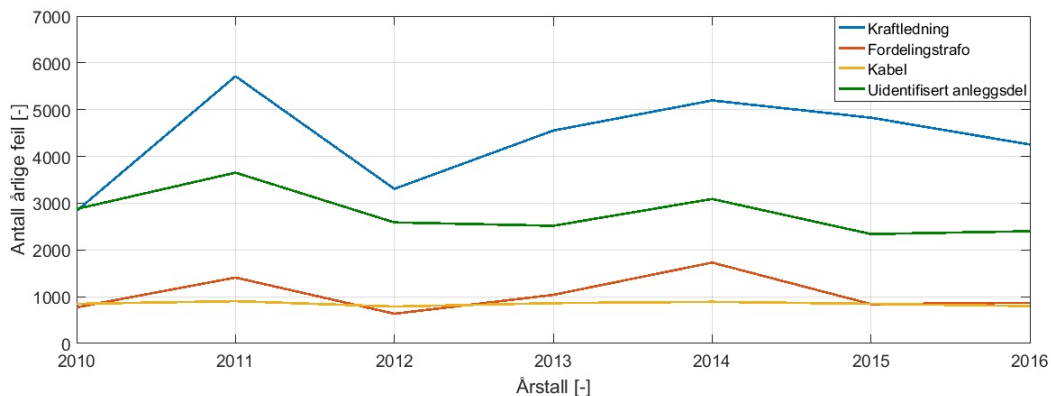


**Figur 4.4:** Illustrasjon av feiltyper i trefase-systemer [20]



### 4.3 Feilstatistikk i høyspennings distribusjonsnett

Driftsforstyrrelser skal registreres i det standardisert registrerings- og rapporteringssystemet, FASIT, ifølge forskrift om systemansvaret i kraftsystemet. Formålet med rapporteringen er å gi en oversikt over feil og avbrudd i det norske distribusjonsnett. Årsstatistikk for driftsforstyrrelser, feil og planlagte utkoplinger i 1 - 22 kV nettet fra 2016 viser at hele 44% av alle feil i distribusjonsnett oppsto på kraftledninger, mens 25% og 8.9% på henholdsvis anleggsdeler ikke identifisert og fordelingstransformatorer [3]. Figur 4.5 viser årlige antall feil for de viktigste feilbefengte anleggsdelene i distribusjonsnett fra 2010 til 2016. Fra figuren kommer det klart frem at kraftledninger er hovedårsaken til feil i det høyspente distribusjonsnett [24].



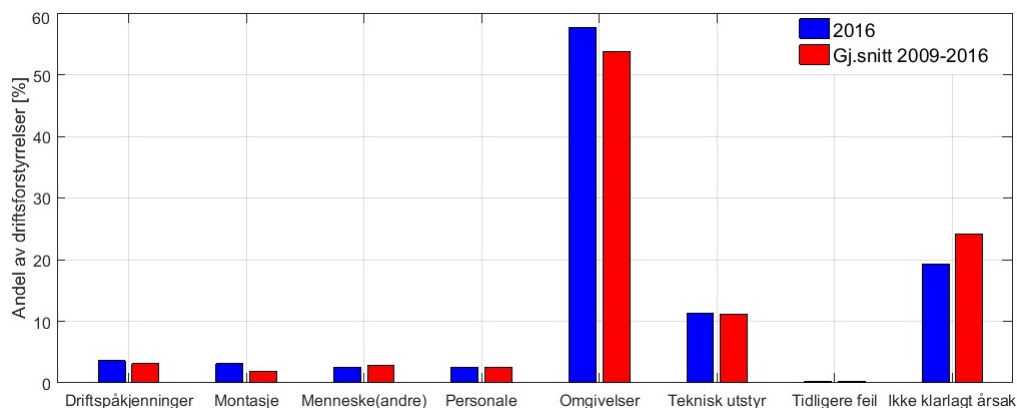
Figur 4.5: Årlig antall feil i høyspennings distribusjonsnett [25]

Feil i distribusjonsnett deles ofte inn i varige- og forbigående feil avhengig om korrigerende vedlikehold er nødvendig. For varige feil er korrigerende vedlikehold nødvendig for å gjenopprette forsyningen. Tabell 4.1 viser anleggsdelene som bidrar mest til varige feil og ikke levert energi. Andelen av varige feil er referert til feilstatistikk fra 2016, mens ILE fra feilstatistikk mellom 2009 - 2016. Det kommer klart frem at kraftlinjer, kraftkabler og fordelingstransformatorer er utslagsgivende for påliteligheten i strømmettet da de til sammen står for 76.2% av all varige feil i 2016, og 76.5% av all ikke levert energi fra 2009 - 2016 [24] [25].

Anleggsdel	Varige feil [%]	ILE pga. feil [%]
Kraftlinje	45.4	53.5
Kabel	16.3	16.3
Ikke identifisert	4.6	11.0
Trafo	14.5	6.7
Lastskillebryter	2.8	2.4
Avleder	2.1	1.9
Samleskinne	2.0	1.3
Vern	0.9	1.2
Effektbryter	0.9	1
<b>Sum</b>	<b>89.5</b>	<b>95.1</b>

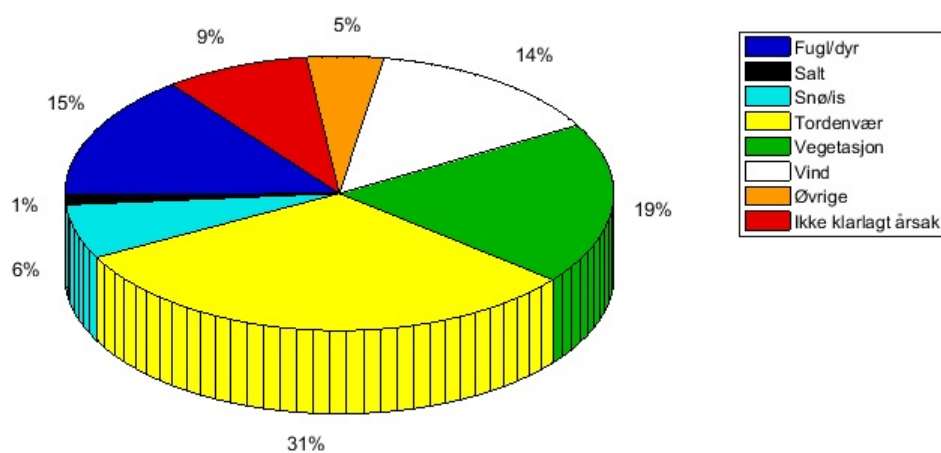
Tabell 4.1: Fordeling av feil og tilhørende ILE på anleggsdeler [24]

Årsstatistikken for driftsforstyrrelser, feil og planlagte utkoblinger viser at *omgivelser*, *ikke klarlagt årsak* og *teknisk utstyr* er hovedårsakene til driftsforstyrrelser i det høyspente distribusjonsnettet i Norge. Figur 4.6 viser at i perioden 2009 - 2016 sto omgivelser for cirka 54% av alle driftsforstyrrelser, mens teknisk utstyr rundt 11% [24].



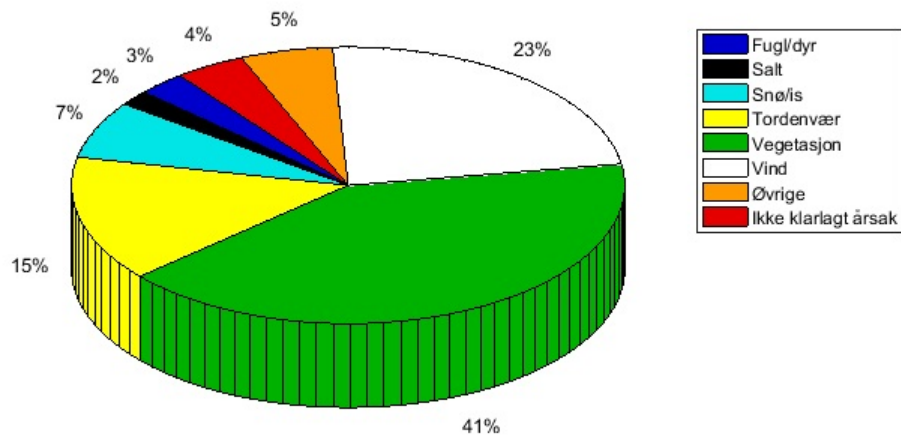
Figur 4.6: Utløsende årsaker til driftsforstyrrelser i distribusjonsnettet [3]

I kategorien omgivelser er det *tordenvær*, *vegetasjon*, *fugl/dyr* og *vind* som forårsaker flest driftsforstyrrelser. Kakediagrammet i figur 4.7 viser utløsende årsaker for driftsforstyrrelser i tidsperioden 2009 - 2016 [25].



Figur 4.7: Andel driftsforstyrrelser med utløsende årsak, kategori *omgivelser* [24]

Selv om tordenvær forårsaker desidert flest driftsforstyrrelser er varigheten av avbruddene relativt kortvarige. Kakediagrammet fra figur 4.8 viser at det er vegetasjon etterfulgt av vind som forårsaker størst andel ikke levert energi. Trefall på kraftlinjer er den viktigste utløsende årsaken til lengre strømbrudd i det norske distribusjonsnett. En av grunnene til dette er at vegetasjonsvolumet rundt kraftlinjene i Norge har doblet seg i løpet av de siste 40 årene, og kan potensielt mangedobles frem til 2030 [26]. På grunn av klimaendringer vokser vegetasjonen raskere, samt flere uværsdager og sterke stormer vil forekomme. I en undersøkelse gitt til 31 ulike norske nettselskaper svarte hele 50% at vegetasjon var et økende problem [27].



**Figur 4.8:** Andel ILE pga. driftsforstyrrelser med utløsende årsak, kategori *omgivelser* [24]

## 5 | Feilhåndtering i distribusjonsnett

Det høyspente distribusjonsnett er delt inn i geografiske områder hvor ulike nettselskap har konsesjon til å drifte og bygge strømmettet. Distribusjonsnett i de ulike konsesjonsområdene styres og tilstandsovervåkes fra nettsentraler ved at måleinstrumenter samler inn sanntidsinformasjon som sendes til driftskontrollsystemet. I den grad fjernstyrte brytere eksisterer i nettet, kan disse fjernstyres fra nettsentralen. Når det oppstår feil i distribusjonsnett er det nettselskapet som har områdekonsesjon som er pliktig til å gjenopprette forsyningen til alle sluttbrukere [28].

### 5.1 Seksjonering

I det en feil oppstår i det høyspente distribusjonsnett vil effektbryter i transformatorstasjon kobles ut slik at hele radialen blir spenningsløs. For å gjenopprette forsyningen seksjoneres og repareres strømmettet. Seksjonering vil si å dele opp strømmettet i mindre deler gjennom koblinger av brytere/seksjoneringspunkter for å isolere og lokalisere feilsted. Hver seksjonering reduserer feilsøkeområdet, og isolerer mulig feilområde slik at forsyningen til friske deler av strømmett kan gjenopprettes via alternative forsyningsveier. Seksjoneringen er en iterativ prosess som praktiseres helt til feil er lokalisert og isolert mellom to nærliggende brytere. Arbeidet med å seksjonere strømmettet blir utført av operatører på nettsentralen som samarbeider med montører ute i felt. Kobling av brytere utføres enten manuelt av montører eller automatisk ved at operatør fjernstyrer brytere fra nettsentralen. Vanligvis er seksjoneringen en kombinasjon av manuell og fjernstyrt seksjonering. Ofte skiller en mellom to seksjoneringsmetoder i høyspennings distribusjonsnett, prøvekobling og isolasjonsmåling/megging.

#### 5.1.1 Prøvekobling

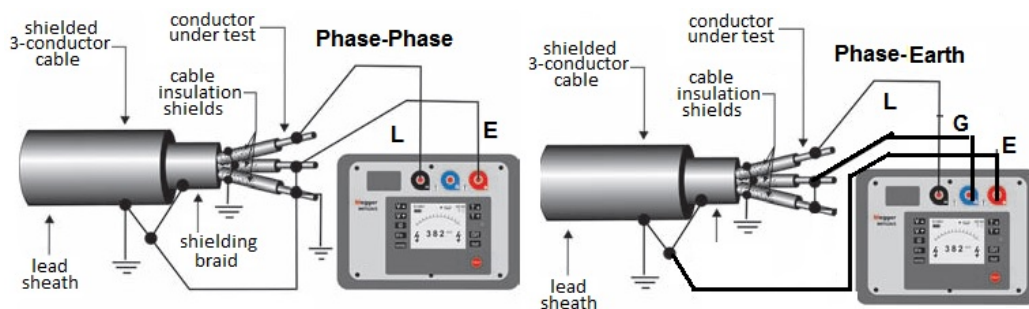
Prøvekoblinger er en seksjoneringsmetode om både kan benyttes i luft- og kabelnett. Det er ofte effektbryteren som har løst ut på grunn av feil, og typisk kobles bryteren inn etter at man har koblet bort deler av nettet der man tror feilen er lokalisert. Prøvekoblingen gir operatør informasjon om feilen er lokalisert nedstrøms eller oppstrøms valgt seksjoneringspunkt avhengig av om effektbryteren blir liggende inne eller utkobles. Om effektbryteren blir liggende inne betyr dette at feilen er nedstrøms seksjoneringspunktet, og hvis effektbryteren utkobles er feilen oppstrøms. På denne måten velger operatør og montør nye seksjoneringspunkter til feilsted er lokalisert og isolert. Tidsaspektet ved prøvekoblinger er avhengig om de utføres fjernstyrt eller manuelt. Fjernstyrte prøvekoblinger utføres i løpet av noen sekunder ved at operatør fjernstyrer brytere fra nettsentralen. Manuelle prøvekoblinger er et samarbeid mellom montør som kobler brytere manuelt og operatør som legger inn effektbryter fjernstyrt. Tidsbruken ved manuelle prøvekoblinger er avhengig av tilgjengelighet og avstand fra montør til valgt seksjoneringspunkt. Den manuelle koblingen i seg selv tar ikke mer enn et minutt eller to. Når prøvekoblinger praktiseres på et radielt strømmett gjenoppretter ikke oppstrøms nett kontinuerlig forsyning før feil er isolert, da effektbryteren benyttes til å utføre prøvekoblinger. Prøvekoblingene fører til at oppstrøms nett blir utsatt for gjentatte inn- og utkoblinger, såkalt *blinking*, ved at effektbryter tripper ved innkoblinger mot feil [21].

Prøvekoblinger fører som regel til flere innkoblinger av effektbryter mot stående feil, noe som kan medføre store elektriske og mekaniske påkjenninger av komponenter. Prøvekoblinger kan også være farlig med tanke på liv og helse dersom mennesker eller dyr skulle vært i nærheten av feilsted i det en prøvekobling utføres. Mange nettselskaper har derfor visse regler og kriterier for når det er forsvarlig å utføre prøvekoblinger.

### 5.1.2 Isolasjonsmåling

Isolasjonsmålinger er en seksjoneringsmetode som i hovedsak blir benyttet på kabelnett. Isolasjonsmålinger går ut på at montør kobler et måleapparat som påtrykker en spenning med en tilhørende liten strøm på enden av en kabelstrekning. Måleapparatet måler deretter motstanden mellom leder og jord for å detektere kortslutning eller jordslutning. Hvis motstanden er liten er dette en indikasjon på kortslutning- eller jordslutningsfeil i retningen av den målte kabelstrekningen. På denne måten vil isolasjonsmålinger indikere feillokasjon på samme vis som for prøvekoblinger. I likhet med prøvekoblinger er isolasjonsmålinger en iterativ prosess som avsluttes i det feil er lokalisert og isolert mellom to nærliggende brytere. I motsetning til prøvekoblinger påfører måleapparatet mye lavere spenninger og strømmer, og er derfor mindre skadelig for elektriske komponenter. Figur 5.1 illustrerer hvordan isolasjonsmålinger fungerer.

For å utføre isolasjonsmålinger må montør opprette to sikkerhetsbarrierer. Den første sikkerhetsbarrieren er synlig brudd til oppstrøms strømmnett. Dette er nødvendig for at innkoblinger av effektbryter ved transformatorstasjon ikke skal kunne påføre fare for montører. Effektbryteren ved transformatorstasjonen telles ikke som synlig brudd med mindre den fysisk frakobles bryterskap. Den andre sikkerhetsbarrieren er å påføre jording og spenningstesting av kabelstrekning. For å kunne jobbe på høyspenningsanlegg skal alltid jording påsettes. Isolasjonsmålinger er av denne grunn en mer tidkrevende seksjoneringsmetode enn prøvekoblinger. Til- og frakoblingen av måleapparatet kan ta mellom 15 - 30 minutter avhengig av hvor erfaren og effektiv montør er. Kapslede brytere er i tillegg mer tidkrevende å utføre isolasjonsmålinger på enn vanlige brytere da kapslingen må demonteres siden bryterne i utgangspunktet er berøringssikre. Meggetiden vil i slike tilfeller kunne bli mellom 10 - 30 minutter lengre enn for vanlige brytere. I motsetning til prøvekoblinger er det krav om at to montører må være til stedet når det skal utføres isolasjonsmålinger [22].



Figur 5.1: Illustrasjon av isolasjonsmåling [29]

---

## 5.2 Feilrettingsforløp ved avbrudd

Følgende beskrivelser av feilrettingsforløp ved avbrudd i høyspennings distribusjonsnett baserer seg på innhentet informasjon fra ulike nettselskaper. Vær oppmerksom på at beskrivelsene er generelle, og nettselskaper kan ha ulik praksis på detaljnivå.

I det en feil oppstår i det høyspente distribusjonsnett vil effektbryteren utkobles slik at hele radialen mister forsyningen. Når avbruddet har oppstått varsles operatøren på nettsentralen om bryterfall gjennom SCADA-systemet eller ved at montører, sluttbrukere eller tilfeldig forbigående melder ifra om avbrudd eller farlige situasjoner. Dersom avgangen er utstyrt med automatisk gjeninnkobling (GIK) vil effektbryteren legges inn før operatøren har tid til å foreta seg noe. Automatisk gjeninnkobling er vanlig i luftnett da denne nettypen er mer utsatt for ytre påvirkninger som kan føre til forbigående jord- eller kortslutninger, eksempelvis lynnedslag, trefall eller fugler som kolliderer med kraftlinjer. En vellykket automatisk gjeninnkobling betyr at feilen var forbigående og normaldrift gjenopprettes, men dersom effektbryteren kobles ut etter GIK er feilen varig, og korrigerende tiltak må utføres for å gjenopprette forsyningen. Ved varige feil må operatøren kartlegge hvilke avganger i strømmettet som er utkoblet, berørte sluttbrukere, arbeid i området og eksterne påvirkninger. Etter å ha opprettet en sak på driftsforstyrrelsen i driftskontrollsystemet, kan sluttbrukere bli informert via SMS-meldinger eller automatisk oppdaterte nettsider. Informasjonen til sluttbrukere er til hjelp for å gi kunder forsikringer om at det jobbes med å gjenopprette forsyningen, samt redusere antall innringninger fra kunder slik at fokuset kan rettes mot feilhåndteringen [22].

Etter at sluttbrukerne er informert om den varige feilen må operatør starte feilhåndteringen. Dersom feilbefengt radial har fjernstyrte brytere tilgjengelig, kobler operatør alltid disse først via SCADA-systemet på nettsentralen. Dette gjøres uavhengig av hvilken seksjoneringsmetode som praktiseres av nettselskapene, fordi tidsbesparelsen er vesentlig. Etter at eventuelle fjernstyrte koblinger er utført starter den manuelle seksjoneringen. Da må operatør vurdere hvilken seksjoneringsmetode som skal benyttes, prøvekoblinger eller isolasjonsmålinger. Hvert enkelt nettselskap har som regel klare retningslinjer for hvilken seksjoneringsmetode som skal praktiseres for gitte feil og nettyper [30]. Underveis i seksjoneringen må operatøren kontinuerlig vurdere risiko for montør forbundet med værforhold, terreng, arbeid på ukjent anlegg, lang arbeidsøkt, befarung i mørket og tilgjengelighet på kommunikasjonsmidler [21].

I tilfeller hvor prøvekoblinger praktiseres, må operatør først vurdere risikoen med å utføre prøvekoblinger. Faktorer som kan være relevante å vurdere er nettverkstopologi, feiltype, topografi, værforhold og tidspunkt på døgnet. Hvis operatør mener det er forsvarlig å utføre prøvekoblinger, vurderes hva som er optimalt seksjoneringspunkt. Deretter kontaktes tilgjengelig montører i område som sendes til en bestemt nettstasjon. Montør ser etter observerbare feil inne i nettstasjonen, og hvis dette kan utelukkes vil montøren koble ut bryteren og forlate nettstasjonen. Operatør på nettsentralen kan da utføre en prøvekobling ved å legge inn effektbryter i transformatorstasjon mot feilbefengt avgang. Resultatet av prøvekoblingen gir en indikasjon om feil er lokalisert opp- eller nedstrøms valgt seksjoneringspunkt. Den iterative prøvekoblingsprosessen fortsetter til feil er isolert mellom to nærliggende brytere.

---

For seksjonering ved hjelp av isolasjonsmålinger blir montør i likhet med prøvekoblinger sendt til et valgt seksjoneringspunkt for å starte seksjoneringen. Montør sjekker først tilstanden i nettstasjonen, og om alt ser bra ut gjennomføres isolasjonsmålinger. For å utføre isolasjonsmålinger må oppstrøms bryter til resten av strømmettet åpnes, slik at krav om synlig brudd tilfredsstilles. Etter at måleapparatet er tilkoblet kabelstrekningen kan isolasjonsmålingene gjennomføres. På samme vis som prøvekoblinger vil målingene gi en indikasjon på om feilsted er i den målte retningen eller ikke. Montør seksjonerer helt til feilbefengt område er lokalisert og isolert mellom to nærliggende brytere.

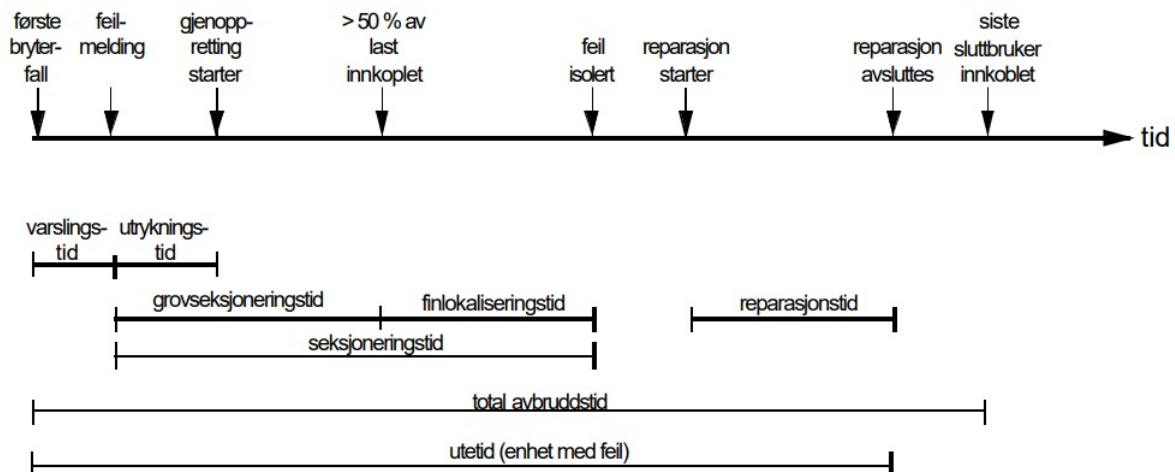
Underveis i seksjoneringen reduseres feilsøkeområdet, og deler av strømmettet isoleres fra feilen. Kontinuerlig ser operatør etter muligheter for innkobling av reservemating fra en annen radial for å forsyne friske deler av strømmettet. I tilfeller hvor reservekapasiteten ikke er stor nok til å forsyne alle sluttbrukere, prioriteres kunder i kategorien “liv og helse” etterfulgt av kundegrupper med høy KILE-satser. Når isolasjonsmålinger praktiseres kan reservemating tilkobles både opp- og nedstrøms feilområde underveis i feilhåndteringen, så lenge feil ikke befinner seg i nettstasjoner. I tilfeller hvor prøvekoblinger praktiseres kan kun nett nedstrøms feil eller i avgreninger isolert fra feilområde gjenopprette kontinuerlig forsyning via reservemating. Oppstrøms nett vil bli utsatt for prøvekoblinger helt til feil er isolert, noe som gjør at forsyningen blir utsatt for hyppige inn- og utkoblinger. Om nettstasjoner ikke får gjenopprettet forsyningen før feilsøking og reparasjon starter, kan nødstrømsaggregat tilkobles. Bruk av nødstrømsaggregat er derimot veldig kostbart, og det må derfor gjøres nøye vurderinger om dette er hensiktsmessig eller ikke. Seksjoneringen er en prosess som i enkelte tilfeller går veldig raskt, men som kan være svært tidkrevende. Tidsaspektet er avhengig av antall koblinger/isolasjonsmålinger, tilgjengelighet, avstander i strømmettet og valg av seksjoneringspunkter. Valg av seksjoneringspunkt baserer seg som regel på tidligere erfaringer, informasjon fra ulike informasjonskanaler, lokale geografiske kunnskaper og operatørs magesfølelse. Hvordan seksjoneringen utføres er derfor veldig personavhengig, og kan variere fra operatør innad i nettselskaper [21]. Seksjoneringsmetodikker og parametere som må inkluderes i beslutningen av seksjoneringspunkter vil bli beskrevet mer detaljert i kapittel 6.

Etter at feil er isolert mellom to nærliggende lastskillebrytere og strømforsyningen til friskt nett er gjenopprettet i størst mulig grad, gjenstår feilsøking og reparasjon av feilbefengt komponent(er). I og med at kabelnett er utstyrt med brytere i hver ende av kabelstrekninger kan feil isoleres uten at sluttbrukere blir påvirket. Dette er ikke tilfellet i luftnett, hvor mange nettstasjoner kan ligge innenfor det feilbefengte området. For kabelfeil har man derfor mer tid til å finne nøyaktig feillokasjon i forhold til i luftnett. I luftnett utføres feilsøking litt forskjellig avhengig av topologi, tilgjengelighet og avstander mellom nettstasjoner. Hvis avstander er store og kraftlinjer strekker seg over ulendt terreng er det vanlig å koble ut alle nettstasjoner i feilbefengt seksjon. Deretter prøvekobler operatør på ren linje for å få en indikasjon på om feil befinner seg i nettstasjoner eller på radialen. Hvis prøvekoblingen er vellykket legges en og en nettstasjon inn for å lokalisere feilbefengt nettstasjon. Dersom prøvekoblingen ikke er vellykket er siste utveg å befare linjer. Befaringen av kraftlinjer utføres til fots eller ved hjelp av kjøretøy. Enkelte nettselskaper ser også på muligheten til å benytte droner til å befare linjer mer effektivt. I omtrent alle tilfeller er feilen i luftnett ukjent til man finner feilstedet. Det hender seg derfor at montører ikke er klar over omfanget og behøver ekstra mannskap, eller at nødvendig feilrettingsutstyr ikke er anskaffet.

Feilsøking i kabelnett kan utføres på flere forskjellige måter. En vanlig metode er å forlokalisere feilavstand på feilbefengt kabelstrekning ved hjelp av ekkometerteknologi. Da tilkobles et pulsekkometer kabelstrekning som påtrykker pulser og estimerer en omtrentlig avstand til feilsted. Etter forlokaliseringen utføres punktnøyaktig feillokalisering for å finne nøyaktig feillokasjon. En vanlig metode er støtspennings- og lyttemetoden. Da benyttes en støtspenningsgenerator som påtrykker kabelen støtspenninger. Støtspenningene gir lysbuer i feilstedet som montør kan lokalisere ved å befare kabeltrasè med marklytteutstyr som mottar både elektromagnetisk puls og akustisk lyd. En annen metode som blir benyttet er skrittspenningsmetoden. Da påtrykkes kabelen spenning, samtidig som montør måler skrittspenninger langs kabeltrasèen [21] [22].

Etter at montører har reparert feilbefengt komponent(er), gjenoprettes forsyningen til alle sluttbrukere og normaldrift opprettes. Ifølge forskrift om systemansvaret i kraftsystemet må utfyllende rapporteringer om driftsforstyrrelsen registreres i det standardisert registrerings- og rapporteringssystemet, FASIT [31].

Feilrettingsforløpet ved avbrudd i det høyspente distribusjonsnettet kan illustreres, se figur 5.2. Figuren er en forenklet og generell fremstilling av hendelses- og tidsforløpet ved avbrudd, og viser det typiske størrelsesforholdet mellom tidene brukt til varsling, utrykning, seksjonering og reparasjon.



**Figur 5.2:** Feilrettingsforløp grunnet varig feil som medfører avbrudd [1]



## 6 | Seksjoneringsmetodikk

Det finnes flere forskjellige seksjoneringsmetodikker som kan benyttes under lokalisering og isolering av feil i luft- og kabelnett. To anerkjente seksjoneringsmetodikker som ofte benyttes er *sekvensiell seksjonering* og *halveringsprinsippet*. Sekvensiell seksjonering går ut på å velge seksjoneringspunkter kronologisk nedstrøms radialen. Det vil si at bryteren nærmest transformatorstasjonen velges som første seksjoneringspunkt, mens neste nedstrøms bryter velges som andre seksjoneringspunkt. Halveringsprinsippet er en metodikk som går ut på å velge seksjoneringspunkter for å halvere en gitt dimensjonerende størrelse. På denne måten vil feilsøkeområdet halveres med hensyn på den dimensjonerende størrelsen for hvert steg i seksjoneringsprosessen. Følgende punkter viser noen kriterier halveringsprinsippet kan basere seg på, halvering av:

- Antall nettstasjoner
- Lengde av radial
- Feilsannsynlighet
- KILE-satser
- Forventede KILE-kostnader
- Last-tyngdepunkt
- Antall avgreninger

Selv om det ofte foreligger en underliggende seksjoneringsmetodikk, følges ikke denne nødvendigvis slavisk. I de fleste tilfeller avviker den virkelige seksjoneringsmetodikken fra den underliggende metodikken grunnet faktorer og sanntidsdata som påvirker valget av seksjoneringspunkter. Punktene listet opp under viser faktorer som operatør må inkludere underveis i seksjoneringen.

- Nettype (luftnett, kabelnett, blandet nett)
- Feiltype (kortslutning, jordslutning)
- Alternative forsyningsveier (reservemating)
- Type brytere og lokasjon av nettstasjon
  - Avstand og tilgjengelighet til nettstasjon
  - Meggetid
- Prioriterte kunder
  - Liv og helse
  - Nettstasjoner med høye KILE-satser

- 
- Værforhold
    - Vindstyrke og vindretning
    - Nedbørsmengde
    - Lynnedslag
    - Vegetasjon rundt linjer
  - Grave arbeid
  - Tid på døgnet
  - Erfaringer
    - Tidligere utsatte områder
    - Topografi
    - “Magefølelse”

## 6.1 Seksjoneringsmetodikker brukt av nettselskaper

Seksjoneringsmetodikkene og kriteriene de baserer seg på varierer fra nettselskap til nettselskap. Til og med innad i nettselskaper kan seksjoneringen utføres forskjellig siden det vanligvis foreligger prosedyrer for seksjoneringsmetoder og seksjoneringsmetodikker i følgende underkapitler er innhentet gjennom samtaler og mailkorrespondanse med driftspersonell og montører i BKK Nett, TrønderEnergi Nett og NTE Nett [21] [22] [23]. For å anonymisere de ulike nettselskapene er det herunder valgt å referere til nettselskap 1, 2 og 3.

### 6.1.1 Nettselskap 1

I det en feil oppstår i distribusjonsnettets benyttes fjernstyrte brytere til å redusere feilområdet raskest mulig. Under den manuelle seksjoneringsmetoden benyttes ulike seksjoneringsmetoder og seksjoneringsmetodikker avhengig av nettype og feiltype. I luftnett baserer seksjoneringsmetoden seg på prøvekoblinger. Prøvekoblingene utføres kun med utløst effektbryter, da det ikke er ønskelig å forplante feil til andre radialer som i utgangspunktet er friske. Seksjoneringsmetodikken er derimot forskjellig avhengig om vern løser ut på grunn av kortslutning eller jordslutning. Ved kortslutningsfeil seksjoneres luftnettet *sekvensielt nedstrøms* til man oppnår tripping av effektbryter på grunn av innkobling mot stående feil. I den isolerte seksjonen benyttes samme sekvensielle metodikk for kobling av skillebrytere for å lokalisere og isolere feil mot minst mulig område eller ut mot fordelingstransformator. I tilfeller hvor vernet løser ut på grunn av jordslutning er fokuset rettet mot å finne feil raskt uavhengig av innkoblinger mot feil. Da seksjoneres luftnettet etter halveringsprinsippet med hensyn på *halvering av lengde av radial*.

Kabelnettet seksjoneres ved hjelp av isolasjonsmålinger uavhengig av feiltype. Seksjoneringspunkter velges med hensyn på *halvering av antall nettstasjoner*. Det er i tillegg rettet stort fokus på å velge seksjoneringspunkter med mange avgreninger, samtidig som meggetid og prioriterte kunder vurderes. I og med at effektbryter i transformatorstasjon ikke benyttes under seksjoneringsmetoden kan friskmeldt nett opp- og nedstrøms feilområdet gjenopprette kontinuerlig forsyning via alternative forsyningsveier. Etter at feil er isolert benyttes en målevogn til å utføre forlokalisering og punktnøyaktig lokalisering som beskrevet i delkapittel 5.2.

I blandet nett benyttes en kombinasjon av seksjoneringsmetodikken for luft- og kabelnett. Først separeres luft- og kabelnettet fra hverandre ved å utføre en prøvekobling i nettskillet.

---

Prøvekoblinger praktiseres fordi det gir en betydelig tidsbesparelse i forhold til isolasjonsmålinger, samtidig som det er stor sannsynlighet for at feil befinner seg i luftnett. Etter at nettypene er separert benyttes de beskrevne seksjoneringsmetodikkene for luft- og kabelnett på de respektive nettypene.

### 6.1.2 Nettselskap 2

I det et avbrudd oppstår i luftnettet sjekker operatør prøvekoblings skjema som er en egenprodusert algoritme som inkluderer parametere angående feiltype, vær og tidspunkt for avbrudd. Algoritmen gir operatøren informasjon om det er forsvarlig å utføre prøvekoblinger eller ikke. Eksempelvis, hvis det oppstår en kortslutning midt på dagen i strålende sommervær vil algoritmen betrakte det som uforsvarlig å utføre prøvekoblinger da det er stor sannsynlighet for at montører eller andre mennesker er innblandet i feil. I tilfeller hvor algoritmen anser det som uforsvarlig venter operatør i 15 minutter før han foretar seg noe, mens om det anses som forsvarlig starter seksjoneringen øyeblikkelig. I likhet med nettselskap 1 benyttes fjernstyrte brytere først, og det er kun utløst effektbrytere som benyttes til å utføre prøvekoblinger da forplantning av feil til frisk radial ikke er ønskelig. Den manuelle seksjoneringen baserer seg på metodikken *halvering av antall nettstasjoner*. Viktige faktorer som liv og helse, prioriterte kunder og montører sine tidligere erfaringer av feil og feillokasjon tas også med i vurderingen av seksjoneringspunkter. Etter at feil er lokalisert mellom to nærliggende brytere legges alle nettstasjoner i seksjonen ut, før en og en bryter legges inn. På den måten vil man kun få en innkobling mot feil etter at feilbefengt seksjon er lokalisert og isolert.

I likhet med luftnett velges seksjoneringspunkter i kabelnett med hensyn på metodikken *halvering av antall nettstasjoner*. Det er likevel økt fokus på å velge seksjoneringspunkter for raskest mulig innkobling av nettstasjoner med høye KILE-satser. Mange av nettstasjonene i kabelnettet til nettselskap 2 er utstyrt med manuelle kortslutningsindikatorer. Underveis i seksjoneringen reiser montører derfor rundt i nettstasjoner og leser av kortslutningsindikatorerne for å unngå prøvekoblinger. I tilfeller hvor kortslutningsindikatorer ikke foreligger benyttes prøvekoblinger som seksjoneringsmetode. Kortslutningsindikatorerne indikerer kun kortslutningsstrømmer, så i tilfeller hvor vern løser ut på grunn av jordslutninger benyttes samme metodikk som for luftnett. Etter at feil er isolert mellom to nærliggende bryterne benyttes en målevogn til å utføre forlokalisering og punktnøyaktig lokalisering på samme vis som nettselskap 1.

I blandet nett velges første seksjoneringspunkt for å separere luft- og kabelnettet fra hverandre. Etter at nettypene er adskilt benyttes prøvekoblinger og halveringsprinsippet på samme vis som for luftnett.

### 6.1.3 Nettselskap 3

Seksjoneringen av luftnett og blandet strømnett utføres på samme måte, og baserer seg begge på prøvekoblinger. Når en feil oppstår gjør operatør i likhet med nettselskap 2 vurderinger av vær og tidspunkt for å evaluere om det er forsvarlig å utføre prøvekoblinger. Hvis feilsituasjonen virker mistenksom og trolig er forårsaket av menneskelige feil, vil operatør avvende situasjonen i 5 – 7 minutter. I motsetning til nettselskap 2 gjøres vurderinger av operatøren på nettsentralen da det ikke foreligger en egenprodusert algoritme. Dersom det er forsvarlig å utføre prøvekoblinger seksjoneres fjernstyrte brytere sekvensielt nedstrøms radialen for å begrense antall innkoblinger mot feil. Den manuelle seksjoneringen baserer seg på halveringsprinsippet, da med hensyn til *halvering av KILE-kostnader*. Operatør gjør også vurderinger av tilgjengelighet til brytere, prioriterte kundegrupper, feilhistorikk og utsatte områder. Selv om luftnettet og blandet nettet seksjoneres likt uavhengig av feiltype, avsettes det mer tid til befarings og feilsøking ved kortslutningsfeil for å unngå unødvendige innkoblinger mot varige feil.

---

I kabelnett benyttes både prøvekoblinger og isolasjonsmålinger uavhengig av feiltype. Prøvekoblinger utføres først for å avgrense feilområdet mest mulig. Når feilbefengt seksjon inneholder mellom 6 – 10 nettstasjoner avsluttes prøvekoblinger med mindre omstendighetene fører til at operatør fortsetter å prøvekoble eller blir tvungen til det. Når feilbefengt seksjon er avgrenset av prøvekoblinger sendes montører ut til nettstasjoner for å utføre isolasjonsmålinger. Seksjoneringspunkter velges etter seksjoneringsmetodikken *halvering av antall nettstasjoner*. I likhet med luftnett er det en rekke faktorer som påvirker valg av seksjoneringspunkter. En av de viktigste faktorene er type bryteranlegg, SF6-anlegg eller luftisolert anlegg. Tidsaspektet ved utførelse av isolasjonsmålinger på SF6-anlegg er mye større enn for luftisolerte anlegg, derfor forsøker operatør å styre unna slike bryteranlegg om mulig.

#### 6.1.4 Oppsummering

Det er mange likheter og ulikheter i seksjoneringsprosessene til de ulike nettselskapene. En oppsummering av seksjoneringsmetoder og seksjoneringsmetodikker for ulike nettyper og feiltyper er illustrert i tabell 6.1. Felles for dem alle er at fjernstyrte brytere kobles først, uavhengig av feiltype og seksjoneringsmetodikk da tidsbesparelsen er vesentlig. Nettselskap 1 skiller seg fra de andre to nettselskapene ved at de har klare retningslinjer for å verne og begrense påkjenninger på komponenter og ivareta personsikkerhet. Blant annet benyttes sekvensiell seksjonering ved kortslutninger i luftnett for å minimere antall innkoblinger mot feil og påkjenninger som følge av feilstrømmer. Ulempen ved bruk av denne metodikken er at seksjoneringen er mye mer tidkrevende, spesielt om feillokasjon er langt ut på radialen. For jordslutninger anses feilstrømmene som ufarlige, derfor seksjoneres luftnettet med hensyn på halvering av lengde av radial. I kabelnett benytter nettselskap 1 isolasjonsmålinger uansett feiltype for å unngå innkobling mot varige feil og verne komponenter. Effektbryteren vil ved denne seksjoneringsmetoden kun utløses i det øyeblikket feilen inntreffer.

Både nettselskap 2 og nettselskap 3 har mye større fokus på å lokalisere og isolere feil raskt. Av denne grunn benyttes prøvekoblinger både for luft- og kabelnett. Seksjoneringsprosessen er likevel forskjellig da ulike seksjoneringsmetodikker benyttes. Nettselskap 2 seksjonerer med hensyn på halvering av antall nettstasjoner for både luft- og kabelnett, mens nettselskap 3 benytter halvering av KILE-kostnader for luftnett og halvering av antall nettstasjoner for kabelnett. Ulempen med bruk av prøvekoblinger både for luft- og kabelnett er at oppstrøms nett blir utsatt for *blinking* da kontinuerlig forsyning ikke gjenopprettes før feil er isolert. Prøvekoblinger er derimot mye mer tidsbesparende i forhold til seksjonering ved hjelp av isolasjonsmålinger.

I blandet nett seksjonerer nettselskapene relativt likt ved å først separere luft- og kabelnettene fra hverandre, for så å utføre en prøvekobling i skille mellom nettypene. Både nettselskap 2 og nettselskap 3 benytter samme seksjoneringsmetode og -metodikk som for deres respektive luftnett. Merkverdig er det at nettselskap 1 går bort ifra prinsippene om å verne komponenter og ivareta personsikkerhet ved å utføre prøvekoblinger på kabelnett. I tilfeller hvor kabelnettet er tilkoblet transformatorstasjonen og feil oppstår i luftnett, vil kabelnettet bli utsatt for flere innkoblinger mot varige feil da prøvekoblinger er eneste mulige seksjoneringsmetode. Uavhengig av feiltype benyttes *sekvensiell seksjonering* for feil i luftnett-delen, da det er ønskelig å begrense antall innkobling mot varige feil.

Nettselskapene har også som grunnprinsipp å ikke forplante feil til friske deler av strømmettet via alternative forsyningsveier. Til og med i tilfeller hvor KILE-kostnadene i friske deler av feilbefengt radial er betydelig mye større enn KILE-kostnadene i den alternative forsyningsveien utføres ikke dette. Nettselskap 1 kan i enkelte situasjoner unngå å utsette friskt kabelnett for

gjentatte innkoblinger mot feil ved å isolere friskt nett og benytte alternative forsyningsveier til å utføre prøvekoblinger. Dette utføres derimot ikke selv om prinsippene om å verne komponenter og ivareta personsikkerhet kan opprettholdes.

Tabell 6.1 representerer de underliggende metodikkene som benyttes av nettselskapene BKK Nett, TrønderEnergi Nett og NTE Nett for ulike nettyper og feiltyper. Under samtaler og mailkorrespondanse med nettselskapene ble det understreket at det forekommer mange faktorer og sanntidsdata som fører til avvik fra seksjoneringsmetodikkene. Vanligvis vil metodikken som benyttes i den virkelige seksjoneringen forandres underveis ettersom mer informasjon om feillokasjon er tilgjengelig. Seksjoneringen kan derfor bestå av mange ulike seksjoneringsmetodikker. Alle strømmett og feilsituasjoner er forskjellige, noe som fører til ulik feilhåndtering.

Nettselskaper	Netttype		
	Luftnett	Kabelnett	Blandet nett
Nettselskap 1	<p><b>Kortslutningsfeil:</b> Prøvekobling sekvensiell seksjonering</p> <p><b>Jordslutningsfeil:</b> Prøvekobling halving av lengde</p>	<p>Isolasjonsmålinger basert på halvering av nettstasjoner uavhengig av feiltype</p>	<p>Kombinasjon av prøvekobling og isolasjonsmåling avhengig av nett-struktur</p>
Nettselskap 2	<p>Prøvekoblinger basert på halvering av nettstasjoner uavhengig av feiltype</p>	<p>Prøvekoblinger basert på halvering av nettstasjon dersom kortslutningsindikatorer ikke forekommer</p>	<p>Prøvekoblinger basert på halvering av nettstasjoner uavhengig av feiltype</p>
Nettselskap 3	<p>Prøvekoblinger basert på halvering av KILE-kostnader uavhengig av feiltype</p>	<p>Kombinasjon av prøvekoblinger og isolasjonsmålinger basert på halvering av nettstasjoner</p>	<p>Prøvekoblinger basert på halvering av KILE-kostnader uavhengig av feiltype</p>

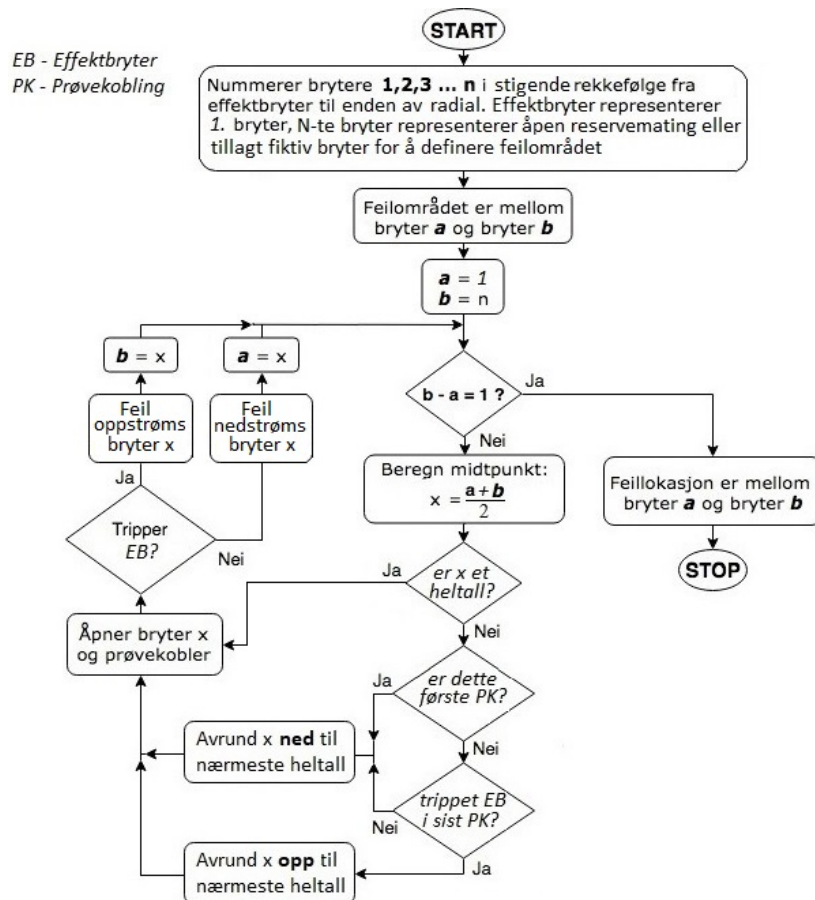
**Tabell 6.1:** Oppsummering av seksjoneringsmetodikker brukt av nettselskaper

## 6.2 Seksjoneringsmetodikker for luftnett-modell

For å analysere seksjoneringsmetodikkene er det utarbeidet en forenklet nettmodell uten avgrensninger som representerer et høyspennings luftnett, se figur 8.1 i delkapittel 8.1. I følgende delkapittel blir de ulike seksjoneringsmetodikkene som er benyttet i analysene av luftnett-modellen beskrevet og illustrert ved hjelp av flytskjema. Metodikkene er gjeldende for nettmodeller med samme struktur som luftnett-modellen, altså nettmodeller uten avgrensninger. Seksjoneringsmetodikkene er etablert for å modellere ulike seksjoneringsforløp ved avbrudd i strømmettet, og baserer seg dels på egen tankegang og dels på virkelige seksjoneringsforløp basert på samtaler med ulike nettselskaper og Sintef Energi.

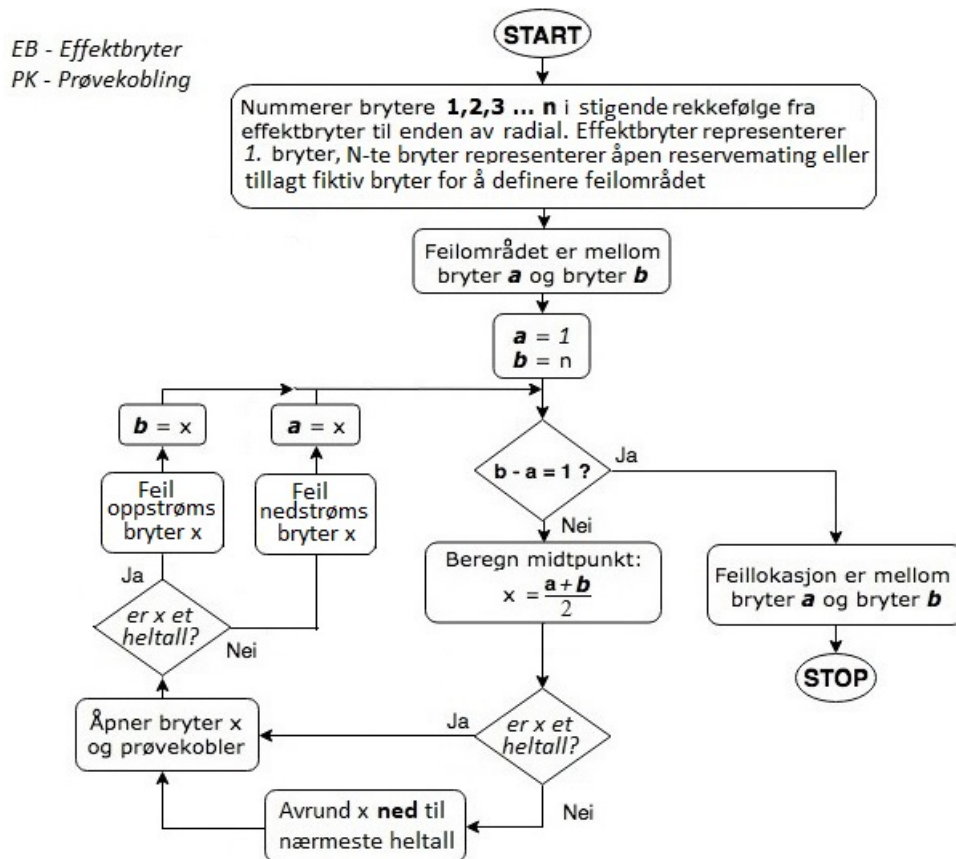
### 6.2.1 Halveringsprinsippet - halvering av antall nettstasjoner

Metodikken går ut på å velge seksjoneringspunkter for å halvere antall nettstasjoner i feilområdet. For hvert steg i seksjoneringsprosessen reduseres feilområdet, og antall nettstasjoner halveres. Seksjoneringsprosessen avsluttes først når feilsted er lokalisert mellom to nærliggende brytere. I enkelte tilfeller vil seksjoneringsmetodikken gi to likeverdige seksjoneringspunkter. Det er derfor valgt å innføre sekundærkriteriene *nærmeste nettstasjon* og *sannsynlighet for innkobling mot varige feil*. Sekundærkriteriet *nærmeste nettstasjon* går ut på å velge seksjoneringspunkter med hensyn på bryteren nærmest forrige seksjoneringspunkt, se flytskjema i figur 6.1. Sekundærkriteriet *sannsynlighet for innkobling mot varige feil* baserer seg på å velge seksjoneringspunktet som gir lavest sannsynlighet for innkobling mot feil. I tilfeller hvor det er to likeverdige seksjoneringspunkter ved første prøvekobling, velges seksjoneringspunktet nærmest trafostasjonen.



**Figur 6.1:** Flytskjema av metodikken *halvering av antall nettstasjoner* med sekundærkriteriet *nærmeste nettstasjon* for luftnett

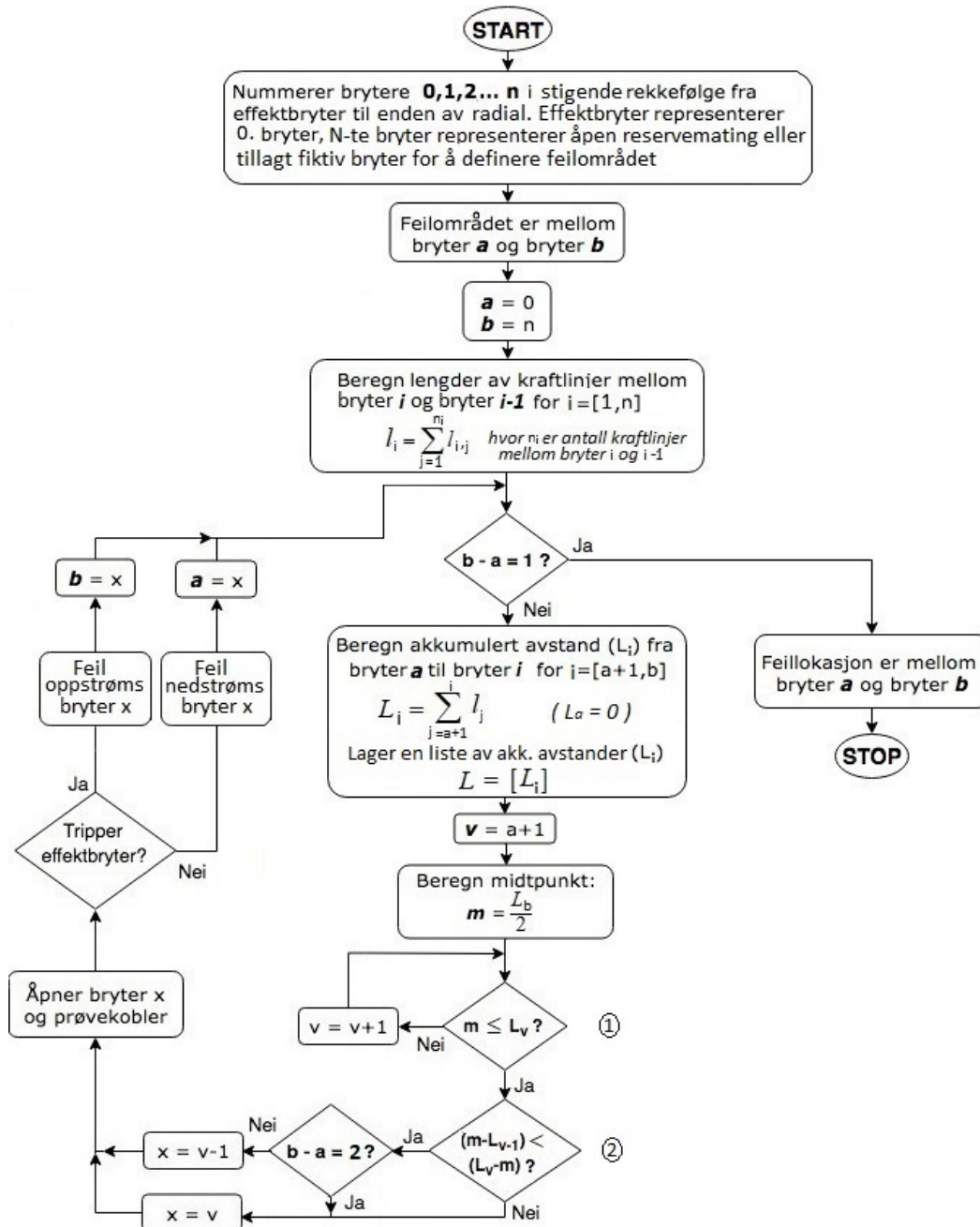
Flytskjema i figur 6.2 illustrerer seksjoneringsmetodikken *halvering av antall nettstasjoner* med sekundærkriteriet *sannsynlighet for innkobling mot varige feil*. Illustrasjonen viser at ved to likeverdige seksjoneringspunkter vil en alltid velge oppstrøms bryter da sannsynligheten for innkobling mot varige feil øker langs radialen. Det vil med andre ord være lavest risiko for innkobling mot varige feil dersom bryteren nærmest transformatorstasjonen seksjonerer.



**Figur 6.2:** Flytskjema av metodikken *halvering av antall nettstasjoner* med sekundærkriteriet *sannsynlighet for innkobling mot varige feil* for luftnett

## 6.2.2 Halveringsprinsippet - halvering av lengde av radial

Metodikken *halvering av lengde av radial* går ut på å velge seksjoneringspunkter for å halvere den totale lengden på radialen. For hvert steg i seksjoneringsprosessen reduseres feilområdet, og den totale lengden på radialen vil halveres ved at friskt nett uteblir fra videre seksjonering. For hver iterasjon beregnes de akkumulerte lengdene for hver bryter i feilområdet. Bryteren som er nærmest midtpunktet av radialen velges som seksjoneringspunkt. I tilfeller hvor midtpunktet er midt mellom to brytere velges bryteren nærmest transformatorstasjonen. Seksjoneringsprosessen avsluttes når feilsted er lokalisert mellom to nærliggende brytere. Flytskjema i figur 6.3 illustrerer seksjoneringslogikken. Fotnoter angir beskrivende kommentarer av merknader i flytskjema.



Figur 6.3: Flytskjema av metodikken *halvering av lengde av radial* for luftnett

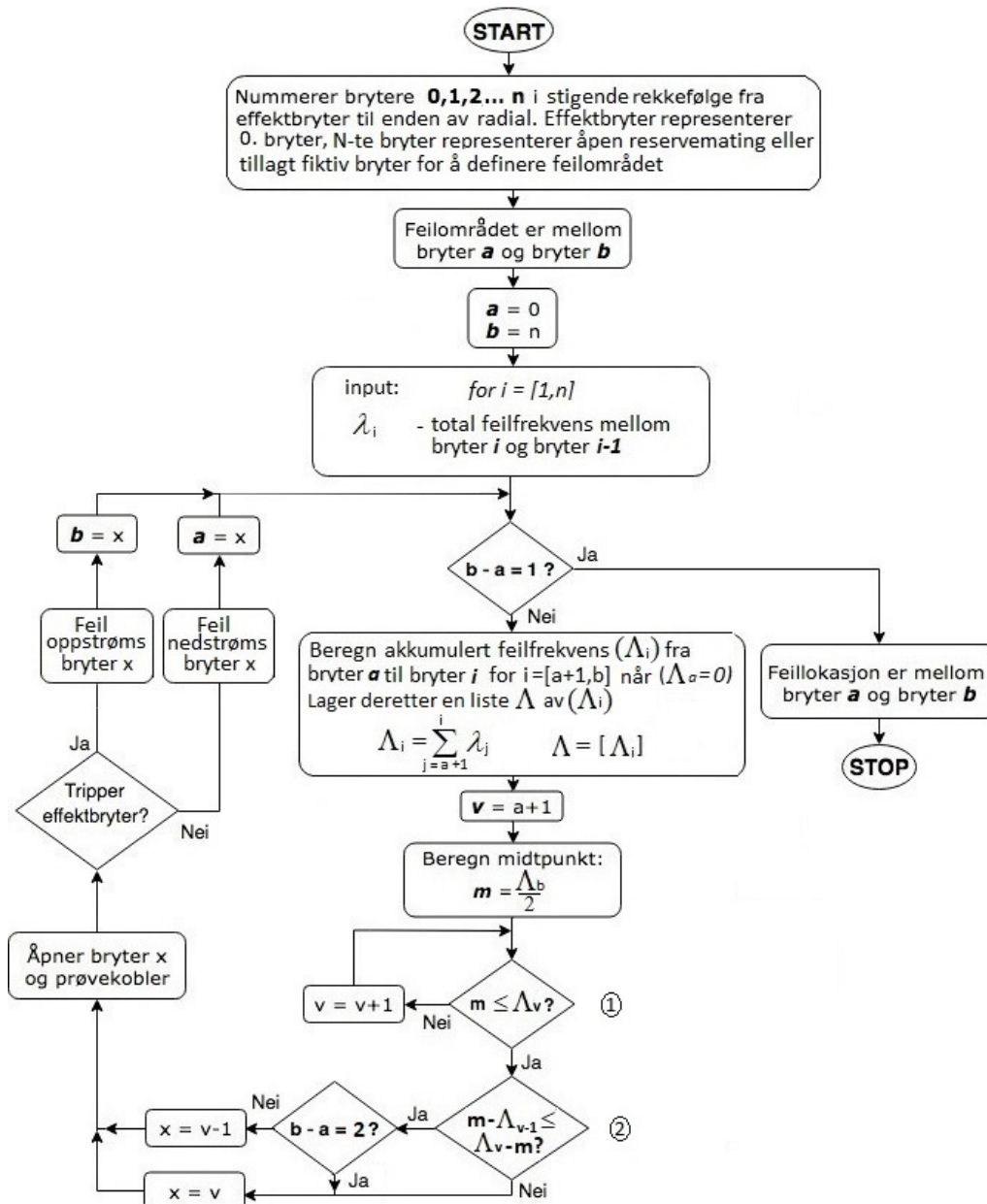
<sup>1</sup>Finner første bryter lokalisert nedstrøms midtpunkt (m)

<sup>2</sup>Finner bryter som er lokalisert nærmest midtpunkt (m)



### 6.2.3 Halveringsprinsippet - halvering av feilfrekvens

Seksjoneringsmetodikken *halvering av feilfrekvens* går ut på å velge seksjoneringspunkter for å halvere den totale feilfrekvensen i feilområdet, se flytskjema i figur 6.4. For hvert steg i seksjoneringsprosessen reduseres feilsøkeområdet, og den totale feilfrekvensen langs radialen vil halveres ved at friskt nett uteblir fra videre seksjonering. Seksjoneringsprosessen avsluttes først når feilsted er lokalisert mellom to nærliggende brytere. I likhet med metodikken *halvering av lengde av radial* beregnes de akkumulerte feilfrekvensene for hver bryter i feilområdet, og bryteren med akkumulert feilfrekvens nærmest midtpunktet velges som seksjoneringspunkt. Hvis midtpunktet er midt mellom to brytere velges bryteren nærmest transformatorstasjonen. Fotnoter angir beskrivende kommentarer av merknader i flytskjema.



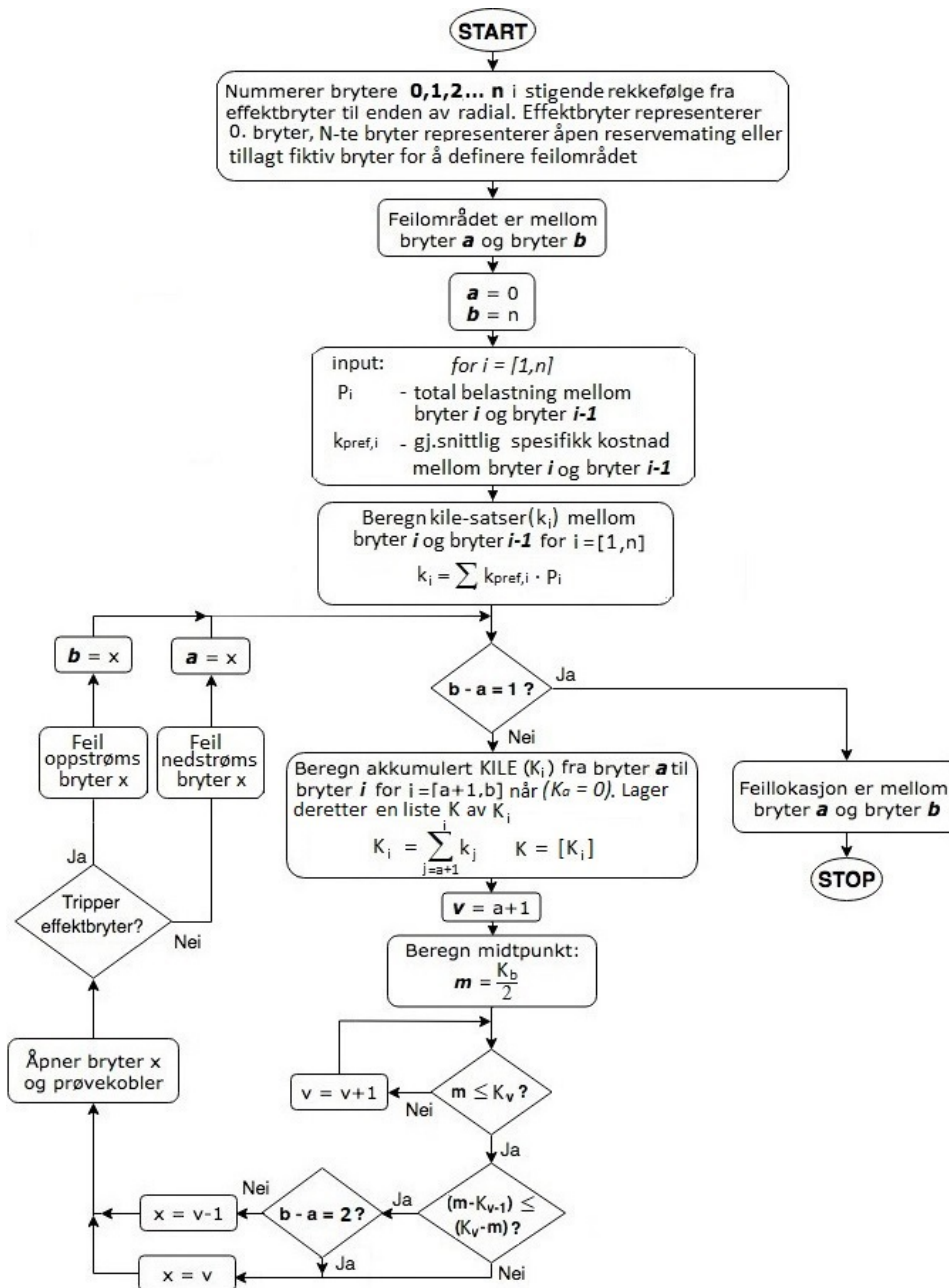
Figur 6.4: Flytskjema av metodikken *halvering av feilfrekvens* for luftnett

<sup>1</sup>Finner første bryter lokalisert nedstrøms midtpunkt (m)

<sup>2</sup>Finner bryter som er lokalisert nærmest midtpunkt (m)

## 6.2.4 Halveringsprinsippet - halvering av KILE-satser

Metodikken *halvering av KILE-satser* baserer seg på å velge seksjoneringspunkter for å halvere de totale KILE-satsene i feilområdet, se flytskjema i figur 6.5. KILE-satsene beregnes ved å multiplisere de spesifikke avbruddskostnadene ( $K_{p,ref}$ ) med belastningen ( $P_i$ ) i en seksjon (mellom brytere). De spesifikke kostnadene er beregnet ved hjelp av kostnadsfunksjonene vist i tabell 2.1 med avbruddsvarighet ( $r$ ) lik 1 time, og vektet med hensyn på kundesammensetning etter likning 2.2. I likhet med de andre metodikkene beregnes KILE-satser mellom brytere og akkumulerte KILE-satser. Bryteren med akkumulert KILE-sats nærmest midtpunktet av de totale KILE-satsene i feilområdet velges som seksjoneringspunkt. I tilfeller hvor midtpunktet er midt mellom to brytere velges bryteren nærmest transformatorstasjonen som seksjoneringspunkt. Seksjoneringen avsluttes når feilsøkeområdet er lokalisert mellom to nærliggende brytere.



Figur 6.5: Flytskjema av metodikken *halvering av KILE-satser* for luftnett

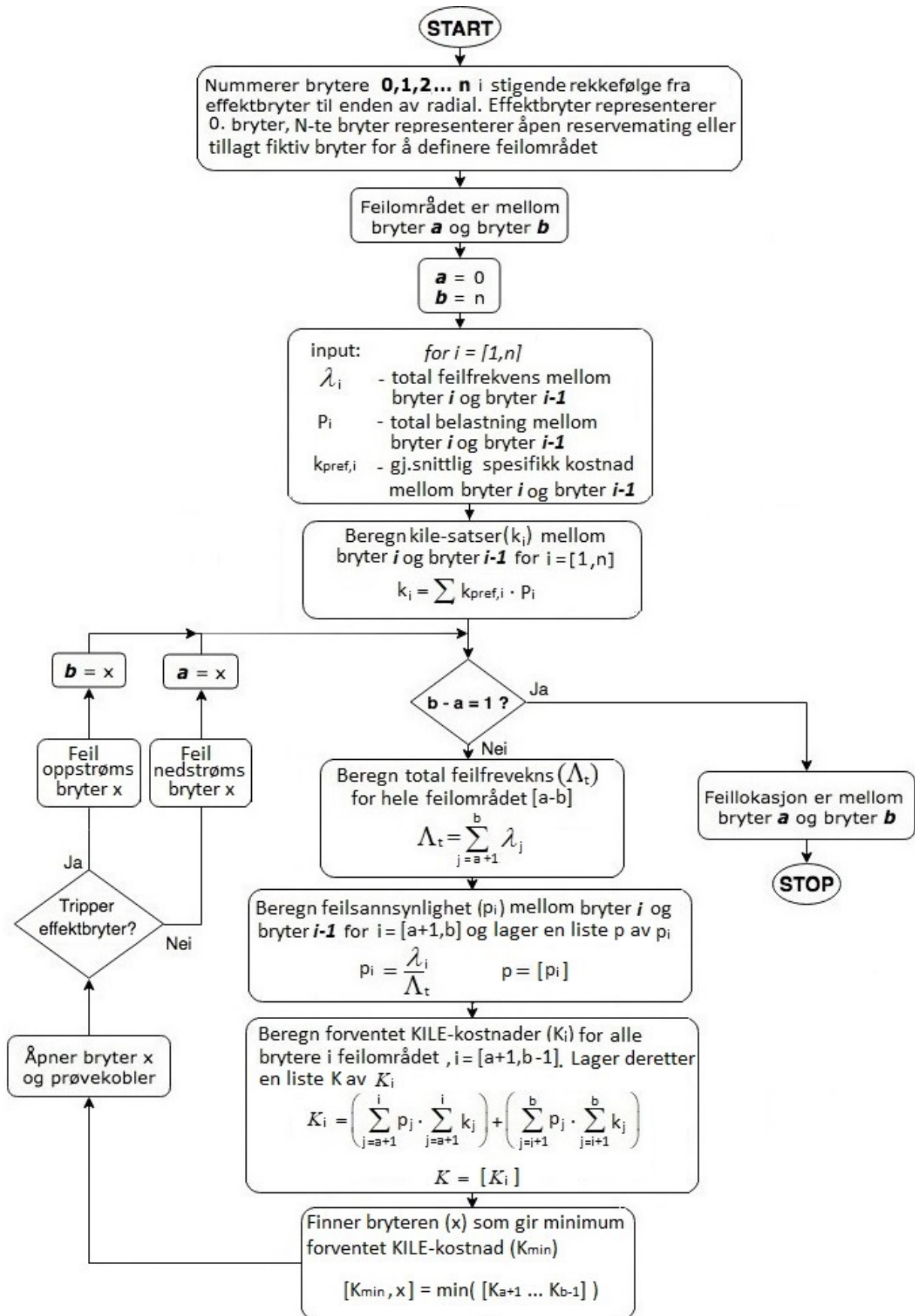
---

## 6.2.5 Halveringsprinsippet - halvering av forventet KILE

Metodikken *halvering av forventet KILE* går ut på å velge seksjoneringspunkter for å minimere de forventede KILE-kostnadene i feilområdet, se flytskjema i figur 6.6. For hvert steg i seksjoneringen beregnes en forventningsverdi for KILE for alle brytere. Forventningsverdien beregnes etter likning 6.1, hvor feilsannsynlighet på anleggsdeler multipliseres med gjennomsnittlig KILE-satser for oppstrøms og nedstrøms område. Forventningsverdien beregnes for hver bryter i feilområdet, og bryteren med lavest forventningsverdi velges som seksjoneringspunkt. I likhet med seksjoneringsmetodikken *halvering av KILE-satser* er de gjennomsnittlige KILE-satsene beregnet ved hjelp av kostnadsfunksjonene fra tabell 2.1 med en avbruddsvarighet ( $r$ ) lik 1 time. Feilsannsynlighetene beregnes ved å dividere feilfrekvensen i hver seksjon med den totale feilfrekvensen i feilområdet. Feilfrekvensene finnes på samme vis som i metodikken *halvering av feilfrekvens*. For hver seksjonering reduseres feilsøkeområdet, og man får ny informasjon om hvor feilen befinner seg. Feilsannsynligheten forandres for hvert steg i seksjoneringen ved at feilsannsynlighetene i friskt strømnnett settes lik 0. Metodikken er utarbeidet av Sintef Energi i forbindelse med prosjektet *FaSAD- Feil- og avbruddshåndtering i smarte distribusjonsnett* [32].

$$K(s) = \lambda_i^s \cdot k_i^s + \lambda_j^s \cdot k_j^s \quad (6.1)$$

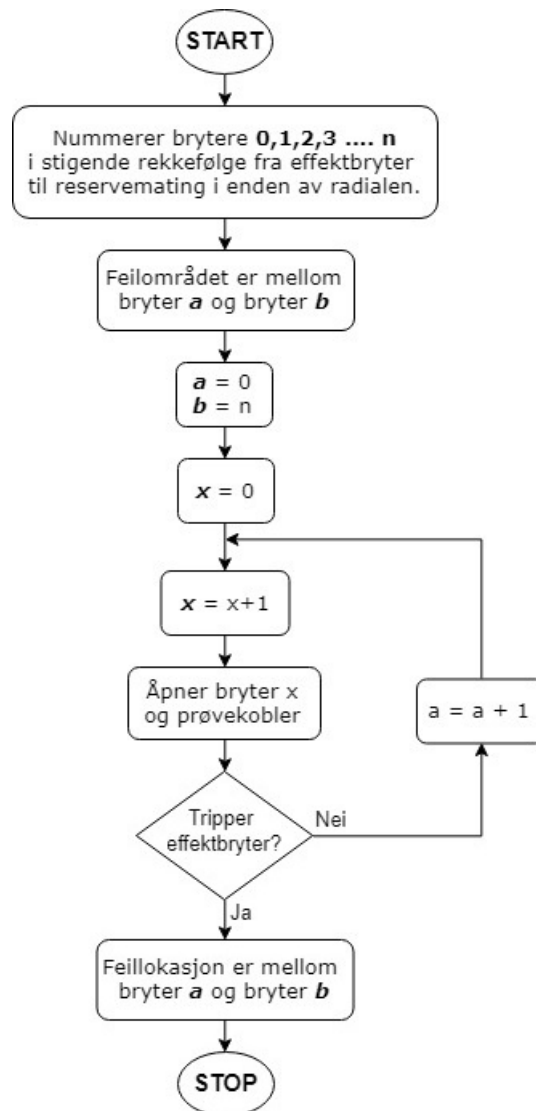
- $s$  - Seksjoneringspunkt  $s$
- $i$  - Feilområde oppstrøms bryter  $s$
- $j$  - Feilområde nedstrøms bryter  $s$
- $E(s)$  - Forventningsverdien for KILE for seksjoneringspunkt  $s$
- $\lambda_{i,j}^s$  - Sum av feilsannsynlighet i område  $i$  eller  $j$
- $k_{i,j}^s$  - Sum av gjennomsnittlig KILE for alle nettstasjoner i område  $i$  eller  $j$



Figur 6.6: Flytskjema av metodikken *halvering av forventet KILE* for luftnett

## 6.2.6 Sekvensiell seksjonering

Seksjoneringsmetodikken *sekvensiell seksjonering* går ut på å velge seksjoneringspunkter kronologisk nedstrøms radialen. Det vil si at bryteren nærmest transformatorstasjonen velges som første seksjoneringspunkt etterfulgt av neste nedstrøms bryter. Dette gjøres uavhengig av antall nettstasjoner, lengde av radial, KILE-kostnader eller feilsannsynligheter. I det effektbryter tripper vil feil være lokalisert mellom nåværende og forrige seksjoneringspunkt. Metodikken blir som tidligere nevnt benyttet for å redusere antall innkobling mot varige feil. Flytskjema i figur 6.7 illustrerer logikken bak seksjoneringsmetodikken.



Figur 6.7: Flytskjema av metodikken *sekvensiell seksjonering* for luftnett

---

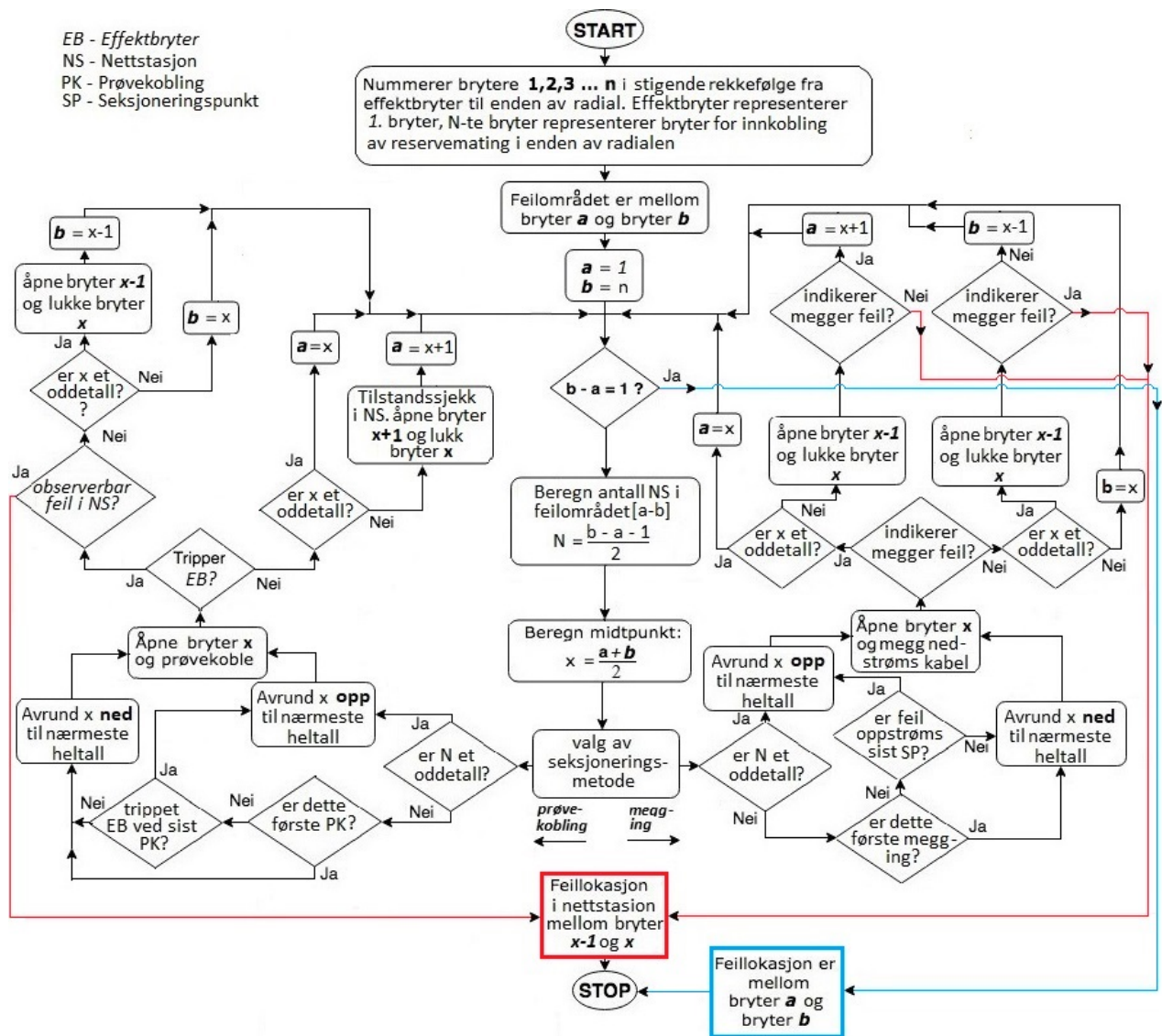
## 6.3 Seksjoneringsmetodikker for kabelnett-modell

Seksjoneringsmetodikkene benyttet i analysene av kabelnett-modellen er på samme måte som for luftnett illustrert ved hjelp av flytskjemaer. Metodikkene er gjeldende for nettmodeller med samme struktur som kabelnett-modellen beskrevet i delkapittel 8.2. Vær oppmerksom på at metodikkene baserer seg på at  $n$ -te bryter representerer oppstrøms bryter i siste nettstasjon. De prinsipielle seksjoneringsmetodikkene for kabelnett er lik som for luftnett, men på grunn av ulik nettstruktur, bryter plasseringer og bruk av seksjoneringsmetoder er flytskjemaer modifisert. Flytskjemaer illustrerer blant annet seksjoneringsforløpet for både seksjonering ved hjelp av prøvekoblinger og isolasjonsmålinger. Siden seksjoneringsmetodikkene benyttet i kabelnett baserer seg på samme tankemåte som for luftnett blir ikke hver metodikk beskrevet like detaljert i følgende underkapitler.

Grunnet nettstrukturen i kabelnett-modellen vil det i de fleste tilfeller være to likeverdige seksjoneringspunkter da hver nettstasjon består av to brytere, en oppstrøms og en nedstrøms. Det er derfor forutsatt at prøvekoblinger og isolasjonsmålinger alltid utføres på nedstrøms bryter (bakomliggende bryter) i en nettstasjon, med mindre seksjoneringsmetodikken eller sekundærkriteriet tilsier noe annet. I likhet med luftnett-modellen er sekundærkriteriene *nærmeste nettstasjon* og *sannsynlighet for innkobling mot varige feil* benyttet. Sekundærkriteriet *sannsynlighet for innkobling mot varige feil* gjelder forøvrig bare for prøvekoblinger, da isolasjonsmålinger ikke medfører innkobling mot varige feil. Det er likevel valgt gjøre analyser med dette sekundærkriteriet for isolasjonsmålinger.

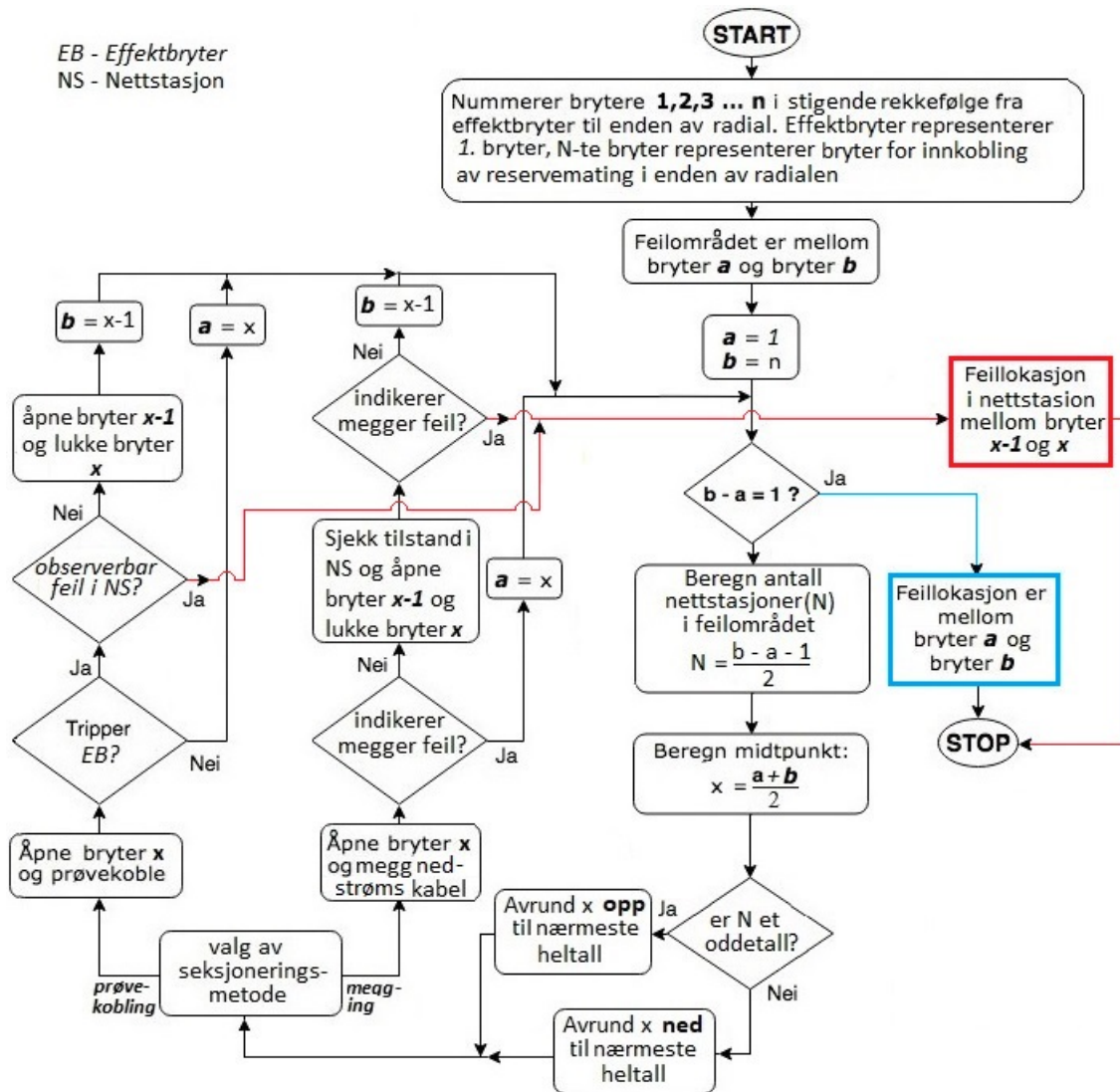
### 6.3.1 Halveringsprinsippet - halvering av antall nettstasjoner

Seksjoneringsmetodikken *halvering av antall nettstasjoner* baserer seg på å halvere antall nettstasjoner i feilområdet. Prinsipielt er metodikken lik som for luftnett, men på grunn av ulikheter i nettstrukturen er tankegangen svært forskjellig. I utgangspunktet er det antatt at nedstrøms brytere alltid benyttes til prøvekoblinger og isolasjonsmålinger, men ved partall antall nettstasjoner i feilområdet tilfredsstiller to brytere kravet om halvering av antall nettstasjoner. For å skille disse ulike seksjoneringsforløpene er sekundærkriteriene *nærmeste nettstasjon* og *sannsynlighet for innkobling mot varige feil* benyttet. Figur 6.8 viser seksjoneringsmetodikken med *nærmeste nettstasjon* som sekundærkriteriet. Feil i nettstasjoner er indikert med rødt, mens feil på kabelstrekning med blått.



Figur 6.8: Flytskjema av metodikken *halvering av antall nettstasjoner* med sekundærkriteriet *nærmeste nettstasjon* for kabelnett

Figur 6.9 viser seksjoneringsmetodikken *halvering av antall nettstasjoner* med *sannsynlighet for innkobling mot varige feil* som sekundærkriteriet. I denne metodikken vil alltid nedstrøms bryter velges som seksjoneringspunkt. Feil i nettstasjoner er indikert med rødt, mens feil på kabelstrekning med blått.

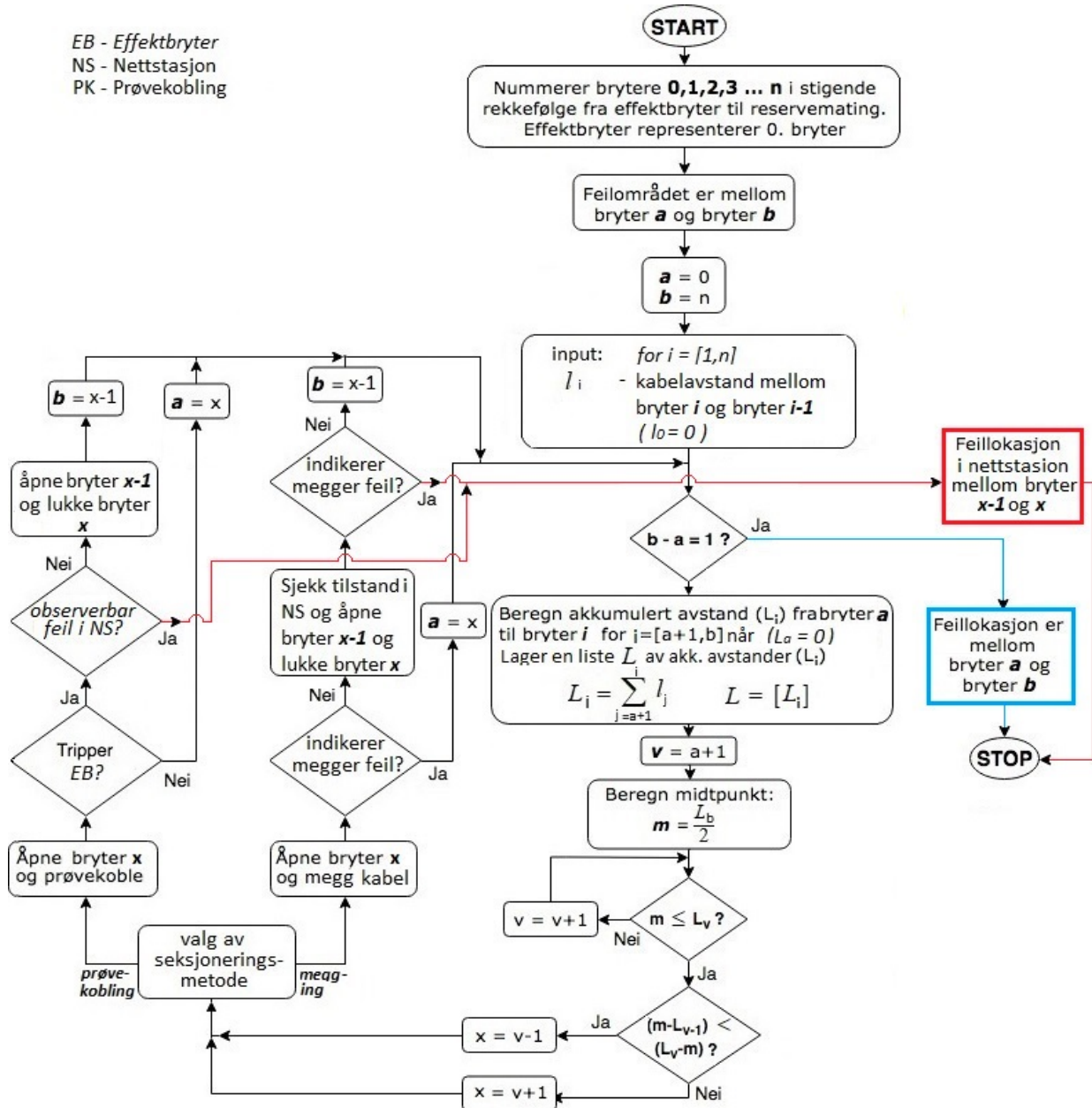


Figur 6.9: Flytskjema av metodikken *halvering av antall nettstasjoner* med sekundærkriteriet *sannsynlighet for innkobling mot varige feil* for kabelnett



### 6.3.2 Halveringsprinsippet - halvering av lengde av radial

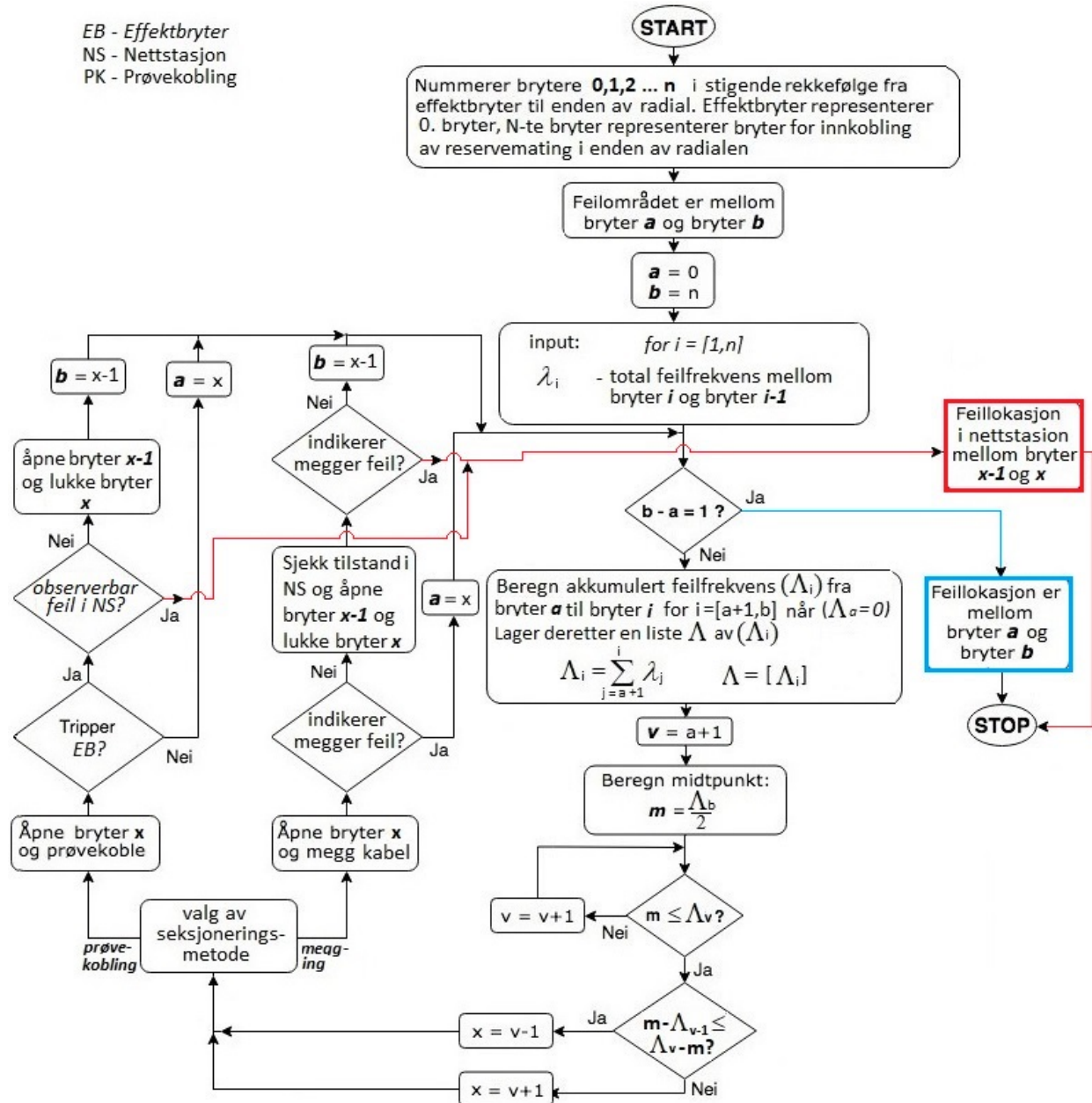
Seksjoneringsmetodikken *halvering av lengde av radial* går ut på å halvere den totale lengden av kabelstrekningene i feilområdet. Avstander mellom brytere i nettstasjoner er antatt å være lik null. For hver seksjonering beregnes midtpunktet av radialen, og nedstrøms bryter i nettstasjon nærmest midtpunktet velges som seksjoneringspunkt. Figur 6.10 viser seksjoneringsmetodikken for både prøvekoblinger og isolasjonsmålinger. Feil i nettstasjon er indikert med rødt, mens feil på kabelstrekning med blått.



Figur 6.10: Flytskjema av metodikken *halvering av lengde av radial* for kabelnett

### 6.3.3 Halveringsprinsippet - halvering av feilfrekvens

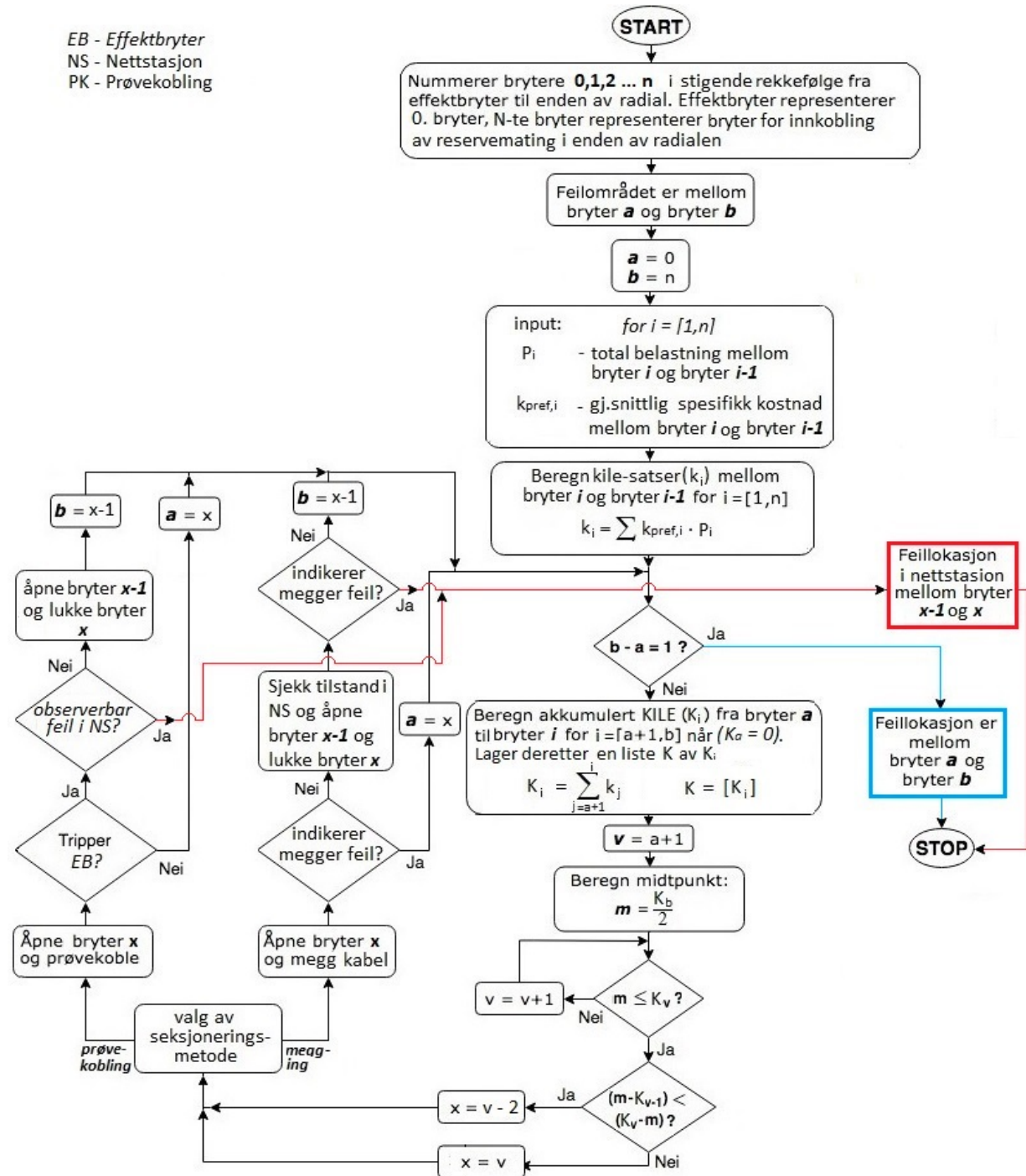
Seksjoneringsmetodikken *halvering av feilfrekvens* går ut på å halvere den totale feilfrekvensen i feilområdet. I analysene er det kun sett på feil på kabelstrekninger, noe som gjør at feilfrekvens for brytere og nettstasjoner er neglisjert. For hver iterasjon velges nedstrøms bryter i nettstasjon nærmest midtpunktet av total feilfrekvens som seksjoneringspunkt. Flytskjema vist i figur 6.11 illustrerer seksjoneringsmetodikken både for prøvekoblinger og isolasjonsmålinger. Feil i nettstasjon er indikert med rødt, mens feil på kabelstrekning med blått.



Figur 6.11: Flytskjema av metodikken *halvering av feilfrekvens* for kabelnett

### 6.3.4 Halveringsprinsippet - halvering av KILE-satser

Seksjoneringsmetodikken *halvering av KILE-satser* går ut på å halvere de totale KILE-satsene i feilområdet. KILE-satsene for hver bryter blir beregnet på samme vis som beskrevet i delkapittel 6.2.4. For hver iterasjon velges nedstrøms bryter i nettstasjon nærmest midtpunkt av KILE-satser i feilområdet som seksjoneringspunkt. Seksjoneringsmetodikken er illustrert i figur 6.12. Feil i nettstasjon er indikert med rødt, mens feil på kabelstrekning med blått.

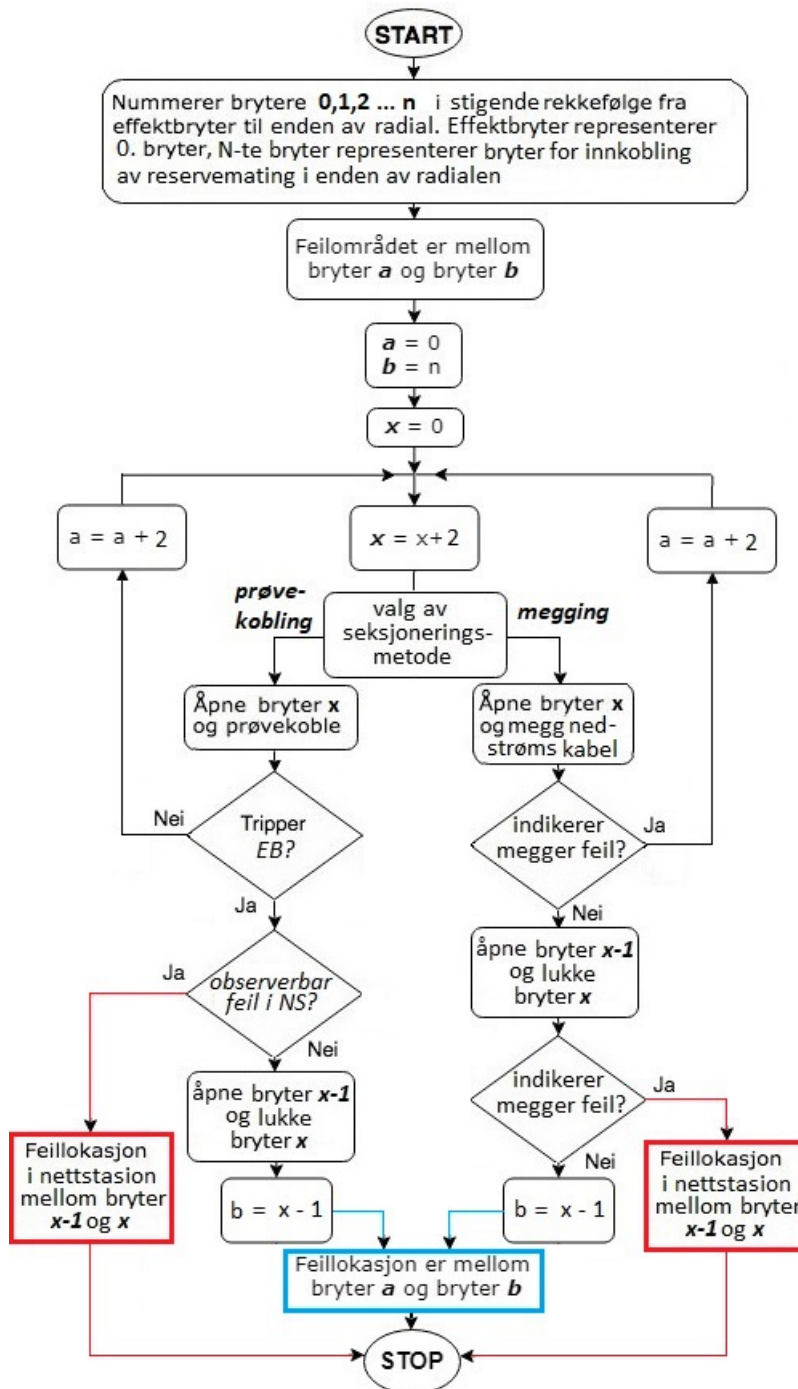


Figur 6.12: Flytskjema av metodikken *halvering av KILE-satser* for kabelnett



### 6.3.6 Sekvensiell seksjonering

Seksjoneringsmetodikken *sekvensiell seksjonering* går i likhet med luftnett-modellen ut på å seksjonere brytere sekvensielt nedstrøms radialen. Det er kun nedstrøms brytere i nettstasjoner som velges som seksjoneringspunkter, se flytskjema i figur 6.14. Feil i nettstasjoner er indikert med rødt, mens feil på kabelstrekning med blått.



Figur 6.14: Flytskjema av metodikken *sekvensiell seksjonering* for kabelnett

## 7 | Kriterier for seksjonering

Hva som er optimal seksjonering ved avbrudd i distribusjonsnett må vurderes ut fra relevante kriterier. Seksjoneringsmetodikk kan evalueres ut fra kvantitative og matematiske optimaliseringsteknikker av såkalte kriteriefunksjoner. Kriteriefunksjoner er et uttrykk for beslutningstakers målsetting, og man ønsker typisk å minimere eller maksimere en eller flere kriteriefunksjoner under gitte forutsetninger, begrensninger og restriksjoner. Formålet med optimaliseringsteknikkene er å finne best mulig løsning av komplekse problemstillinger av ulik vanskelighetsgrad underlagt bestemte betingelser. Kriteriefunksjonene består gjerne av flere definerte kriterier som er vektet avhengig av relevans. I forbindelse med pålitelighetsanalyser og seksjonering av høyspennings distribusjonsnett kan leveringspålitelighet, spenningskvalitet, aldring av komponenter, omdømme og personsikkerhet være eksempler på kriterier som en kriteriefunksjon består av. En vanlig optimaliseringsteknikk er *Multi-objektiv optimalisering (multi objective optimization)* som innebærer matematiske optimaliseringsproblemer som involverer mer enn en kriteriefunksjon som optimaliseres samtidig. Denne teknikken er mye brukt siden nesten alle virkelige optimaliseringsproblemer kan modelleres ved hjelp av to eller flere motstridende mål [33]. For å gjøre en vurdering av hva som er optimal seksjoneringsmetodikk må de ulike definerte kriteriene optimaliseres vektet etter hva som er av størst betydning for det gitte nettselskapet. Enkelte nettselskaper har størst fokus på personsikkerhet, mens andre verdsetter de økonomiske innvirkningene mest. I følgende kapittel blir de ulike kriteriene som er tatt med i vurderingene av seksjoneringsmetodikkene presentert. Siden dette ikke er en optimaliseringsoppgave er det ikke lagt kriteriefunksjoner og utført optimaliseringsanalyser. De økonomiske innvirkningene av alle kriteriene er heller ikke kvantifisert, men det gis et innblikk i kriterienes opphav og betydning for seksjoneringen av distribusjonsnett.

### 7.1 Leveringspålitelighets kriterier

Leveringspålitelighet er et viktig kriterie med hensyn på seksjonering av distribusjonsnett. Som tidligere nevnt er leveringspålitelighet et mål på hvor ofte det oppstår avbrudd i strømmettet. Avbruddene påfører nettselskaper store kostnader, spesielt med tanke på de kvalitetsjusterte inntektsrammene for ikke levert energi. Nettselskaper har derfor økt fokus på å utføre pålitelighetsanalyser for å utrede tiltak som kan forbedre påliteligheten, og dermed redusere avbruddskostnadene. Pålitelighetsindeksen *forventet årlig KILE-kostnad* er derfor kanskje den viktigste faktoren under kriteriet leveringspålitelighet.

---

## 7.2 Spenningskvalitets kriterier

For at den elektriske energien i kraftsystemet skal kunne benyttes og ikke skade elektriske apparater, må spenningen være av en viss kvalitet. Et mål på anvendeligheten til den elektriske energien er spenningskvalitet. Under spenningsforstyrrelser oppstår spenningsfenomener som gir negative innvirkninger på spenningskvaliteten i strømmettet. Spenningsdipp, overspenninger og spenningsusymmetri er eksempler på spenningsfenomener som kan oppstå *ved seksjonering av distribusjonsnett*.

### 7.2.1 Spenningsdipp

Spenningsdipp er hurtig reduksjon av spenningens effektivverdi til under 90%, men større enn 5% av referansespenning, med varigheter mellom 10 millisekunder til 60 sekunder [34]. Hovedårsakene til at spenningsdipper oppstår ved seksjonering av høyspennings distribusjonsnett er elektriske kortslutninger og inn- og utkoblinger av store laster. De elektriske kortslutningene fører til store kortslutningsstrømmer, noe som gir spenningsfall over impedansene i systemet. Innkobling av store laster trekker store startstrømmer som gir lik effekt som kortslutninger. Spenningsdipp fører til at energien som tilføres elektriske apparater ikke er tilstrekkelig for at deres funksjon skal kunne utføres, eller at funksjonen begrenses. Mikroprosessor systemer er spesielt sensitive for spenningsdipper da uregelmessig drift kan føre til utfall av systemer og tap av overføring. Kontaktorer og reléer som blir brukt til å bryte strømmer kan også påvirkes av uregelmessige spenningsvariasjoner, og føre til ukontrollerte utkoblinger. Spenningsdipper større enn 30% av referansespenning påvirker induksjonsmotorer ved at det elektromagnetiske dreiemomentet minker og hastigheten reduseres. Etter spenningsforstyrrelsen vil motoren trekke store startstrømmer som igjen kan forlenge varigheten av spenningsdipper [35]. I følge [36] er årlige kostnader tilknyttet spenningsdipp i Norge anslått å være omlag 250 millioner kroner.

### 7.2.2 Overspenninger

Overspenninger er hurtig økning i spenningens effektivverdi til høyere enn 110% av referansespenningen, med varighet fra 10 millisekunder til 60 sekunder [34]. Ofte skiller man mellom kontinuerlige-, midlertidige-, transiente- og kombinerte overspenninger avhengig av form på spenningskurve og varighet. I forbindelse med seksjonering av distribusjonsnett kan det oppstå overspenninger ved bryterkoblinger. Bryterkoblinger endrer topologien av strømmettet noe som kan gi opphav til transiente overspenninger eller høyfrekvente overspenninger. Bryting av små induktive strømmer er verst da det kan gi store overspenninger avhengig av størrelsen på kapasitansene i strømmettet. Det kan også oppstå overspenninger som følge av kortslutninger i distribusjonsnett. De største konsekvensene oppstår derimot på lavspenningssiden da standarder inkluderer disse fenomenene ved å foreskrive passende isolasjonskrav og tester [37].

### 7.2.3 Spenningsusymmetri

I trefasesystemer er ubalansert spenning definert som tilstanden når fasespenningene ikke har lik magnitudo og/eller fasevinklene mellom fasene ikke er 120 grader forskjøvet. Spenningsusymmetri er et resultat av ubalansert drift av enfase eller trefase laster som gir usymmetriske spenningsfall i de individuelle fasene. I forbindelse med seksjonering av distribusjonsnett kan spenningsusymmetri oppstå som følge av inn- og utkoblinger av laster. De usymmetriske spenningsfallene gir usymmetriske strømmer som resulterer i redusert overføringsevne grunnet varmetap og ytterligere effekt- og energitap. Spenningsusymmetri virker også negativt på induksjonsmotorer, synkrongeneratorer og likerettere. Induksjonsmotorer og synkrongeneratorer vil blant annet bli utsatt for ytterligere varme- og effekt tap, mens likerettere kan gi harmoniske og interharmoniske svingninger [37].

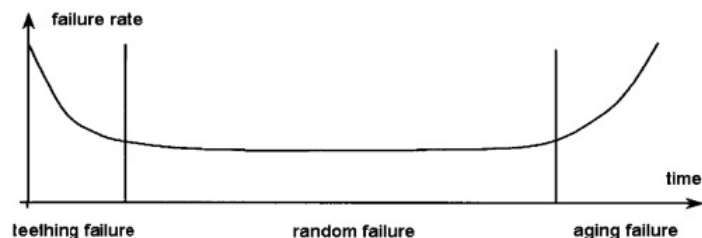
---

## 7.2.4 Økonomiske konsekvenser av redusert spenningskvalitet

Kostnader tilknyttet dårlig spenningskvalitet i kraftsystemer deles ofte inn i følgende kategorier, spenningsdipp, kortvarige avbrudd, langvarige avbrudd, harmoniske- og interharmoniske svingninger, transiente spenninger, flimrer, spenningsusymmetri og jordingsproblematikk. I evalueringen av de økonomiske innvirkningene inkluderes kostnader tilknyttet personell, pågående arbeidsprosesser, funksjonsfeil- og skade av komponenter, straffer og bøter, spesifikke kostnader og besparelser. Enkelte av kostnadene skyldes direkte økonomiske innvirkninger. Disse kostnadene kan tallfestes da de er forbundet med produksjonstap, utetid, svinn av uferdig produksjon, gjenoppretting av prosesser, ødeleggelse av elektrisk utstyr eller avbruddskostnader. De indirekte økonomiske innvirkningene er derimot vanskelige å kvantifisere. Indirekte kostnader tilknyttet dårlig leveringskvalitet kan være alt fra kostnader grunnet utsatt inntekter for organisasjoner, tap av markedsandeler, kostnader tilknyttet gjenoppretting av merkeverdi eller redusert arbeidseffektivitet som følge av dårlig personsikkerhet og/eller arbeidsmiljø.

## 7.3 Aldring av elektriske komponenter

Elektriske komponenter som benyttes i høyspennings distribusjonsnett er som regel designet for å ha en forventet levetid på rundt 40 år. For å oppnå moderat levetid kreves tilstrekkelig reinvesteringer i vedlikehold og utskiftning av elektriske komponenter. Grunnet begrenset reinvesteringer vil alderen på elektriske komponenter i strømmettet øke, noe som gir økt feilfrekvens ifølge figur 7.1. Figuren viser at feilfrekvenser er størst under produksjonsprosessen. Under produksjonsprosessen elimineres feil ved at det blir utført rutinemessige tester på komponentene før de utleveres. Etter produksjonsprosessen minker feilfrekvensen betraktelig, og holdes relativt konstant. Etterhvert som komponenten eldes øker feilfrekvensen som følge av aldringsprosesser [38].



Figur 7.1: Badekarkurve [38]

Aldring er et fysisk fenomen som medfører reduksjon av den fysiske eller kjemiske karakteristikkene til et materiale, og forekommer når elektriske komponentene blir utsatt for elektrisk, termisk, mekanisk eller miljøpåvirket stress. Komponentene påvirkes forskjellige av ulike typer stress, og kan bli utsatt for forskjellige aldringsprosesser. Det er derfor vanlig å dele inn elektriske komponenter i distribusjonsnettet inn i fire kategorier, kraftlinjer, kabelsystem, nettstasjon og koblingsanlegg. Tabell 7.2 viser andelen av tilfeldige feil og aldringsfeil, samt hvilke type komponenter innenfor hver kategori som bidrar til størst andel feil. Generelt sett er det nettstasjoner, koblingsanlegg og kabelsystemer som blir utsatt for flest aldringsfeil, og innenfor disse kategoriene er det henholdsvis transformatorer og effektbrytere og kraftkabler som forårsaker feilene. Aldring av transformatorer i nettstasjoner er relatert til aldring av viklinger, tanker og trinnkoblere. Viklinger eldes ved termisk stress grunnet overlast eller mekanisk stress via vibrasjoner som kan oppstå under kortslutninger. Tanker blir utsatt for rust som følge av operasjonstiden til transformatoren og dårlig vedlikehold. Aldringsfeil på effektbrytere oppstår som regel av materialtretthet som reduserer den mekaniske styrken.



Materialtrettheten kan komme av vibrasjoner og kreftene som oppstår ved kortslutninger. I kraftkabler er det urenheter, korrosjon og endringer i krystallinsk struktur som er de mest vanlige aldringsprosessene. Disse aldringsprosessene kan føre til skader som følge av partielle utladninger, formasjon av vanntre og elektriske tre eller termo-kjemiske prosesser. For kraftlinjer er det korrosjon som er den dominerende aldringsprosessen. Mengden av korrosjon som oppstår er avhengig av faktorer som fuktighet, salt, vind og is, samt hvor ofte vedlikehold utføres. De fleste feil på kraftlinjer oppstår som følge av stokastiske hendelser, og ikke av aldringsfeil. Dette skyldes at kraftlinjer er svært utsatt for eksterne miljøpåvirkninger som vind, vegetasjon og atmosfæriske overspenninger.

Electrical Component	Failure Location	Random Failure	Aging Failure
Overhead Line	Conductor (67 %)	90 %	10 %
Cable System	Cable (66 %)	40 %	60 %
Secondary-substation	Transformer (19 %)	30 %	70 %
Switchgear-station	Circuit-breaker (36 %)	10 %	90 %

Aging failure: decrease of electrical or mechanical strength; Random failure: External effect; Numbers: percentage by failure location or failure cause ( $a_i$ ).

**Figur 7.2:** Feilstatistikk av elektriske komponenter grunnet fenomenet aldring [38]

Estimater av levetiden for kraftkabler, transformatorer, effektbrytere og kraftlinjer som blir utsatt for termisk, mekanisk og elektrisk stress kan beregnes ved hjelp av *inverse power model* og *Arrhenius model* [38] [39]. I forbindelse med seksjonering av distribusjonsnett vil det i hovedsak oppstå mekanisk og elektriske påkjenninger av komponenter grunnet innkoblinger mot varige feil. Det er likevel ikke funnet estimater som tilsier hvordan levetiden av de elektriske komponentene påvirkes av kortslutningsstrømmene. De økonomiske innvirkningene grunnet innkoblinger mot varige feil er derfor ikke kvantifisert i denne oppgaven. Redusert levetid som følge av innkobling mot kortslutninger vil derimot bli drøftet i vurderingene av de ulike seksjoneringsmetodikkene.

## 7.4 Personikkerhet

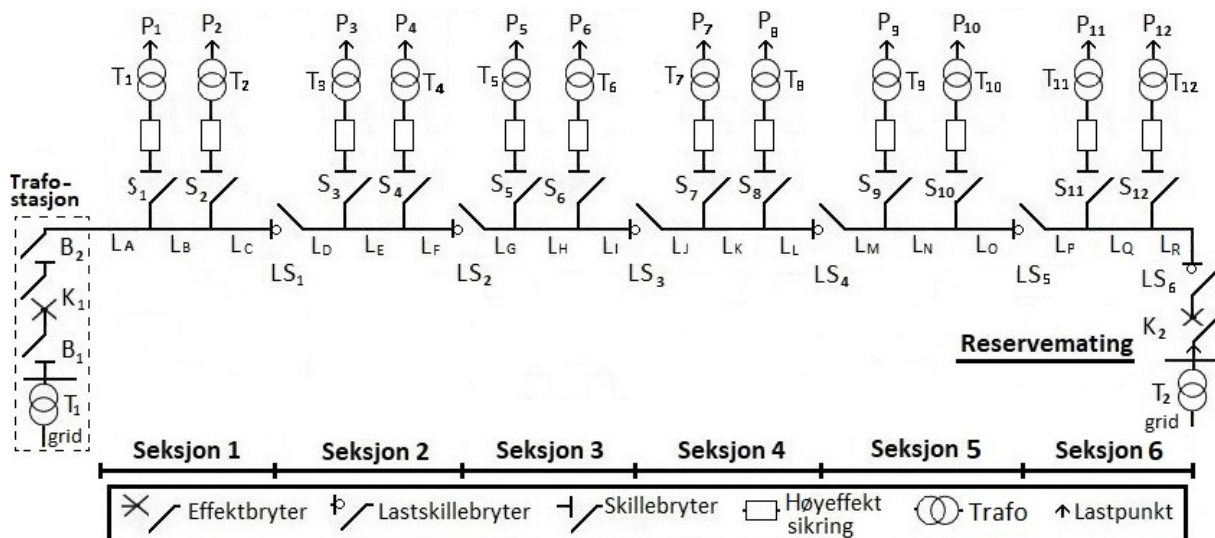
I følge forskrift om elektriske forsyningsanlegg skal elektriske anlegg prosjekteres, driftes og vedlikeholdes slik at de sikkert ivaretar tiltenkt funksjon uten å fremby fare for liv, helse og materielle verdier [40]. Personikkerhet er derfor svært viktig for nettselskaper. Elektrisitetetsforskriftene (FSE) og internkontrollforskriften (FEF) pålegger blant annet nettselskaper å foreta risikovurderinger av elektriske anlegg og arbeidsoperasjoner. For å bevare personikkerhet kan det utføres risikoanalyser og sikker jobb analyse (SJA) for vurdering av risiko tilknyttet arbeidsutførelser. I forbindelse med seksjonering av distribusjonsnett er personikkerhet forbundet med valg av seksjoneringsmetode, prøvekoblinger eller isolasjonsmålinger, og valg av seksjoneringsmetodikk. Prøvekoblinger kan potensielt medføre stor fare for mennesker eller dyr dersom de skulle være lokalisert i nærheten av feilområde ved innkobling mot varig feil. Isolasjonsmålinger er derimot en seksjoneringsmetode som ikke medfører innkoblinger mot feil, og gir derav høy personikkerhet. I delkapittel 6.1 fremkommer det gjennom samtaler med driftspersonell at det gjøres nøye vurderinger av personikkerhet før prøvekoblinger utføres. Enkelte seksjoneringsmetodikker har også større fokus på å redusere antall innkoblinger mot feil enn andre, og av den grunn vil gi høyere personikkerhet. Seksjoneringsmetodikken *sekvensiell seksjonering* er et eksempel på en slik metodikk.

## 8 | Beskrivelse av nettmodeller

For å vurdere seksjoneringsmetodikkene er det utført pålitelighetsanalyser av de beskrevne metodikkene fra delkapittel 6.2 og delkapittel 6.3 for to egendefinerte nettmodeller. Nettmodellene representerer forenklede modeller av høyspennings- luftnett og kabelnett, og er utarbeidet i samarbeid med veileder Kjell Sand og Line Bergfjord i BKK.

### 8.1 Luftnett-modell

Luftnett-modellen representerer et forenklet 22 kV luftnett uten avgreninger, se figur 8.1. Radialen driftes radielt og forsynes fra transformatorstasjonen, men har en alternativ forsyningsvei i enden av radialen ved å lukke den fjernstyrte lastskillebryteren ( $LS_6$ ). Totalt sett består nettmodellen av tolv nettstasjoner som transformerer ned spenningen og forsyner sluttbrukere ( $P_n$ ) i det lavspente distribusjonsnettet. Radialen er sammenkoblet av atten kraftlinjer ( $L_n$ ) bestående av ulike lengder. Modellen er også delt inn i seks ulike seksjoner ved hjelp av fem manuelle lastskillebrytere ( $LS_n$ ) som er plassert langs radialen. Disse bryterne muliggjør seksjonering av nettet for lokalisering og isolering av feil, samt forsyning av friskt nett via reservemating.



Figur 8.1: Representasjon av luftnett-modell

#### 8.1.1 Nettspesifikasjon for luftnett-modell

- Alle kraftlinjer i samme seksjon har lik lengde
  - Kraftlinjer i seksjon 1 er 0.5 km
  - Kraftlinjer i seksjon 2 er 1 km

- Kraftlinjer i seksjon 3 er 1.25 km
- Kraftlinjer i seksjon 4 er 1.75 km
- Kraftlinjer i seksjon 5 er 2 km
- Kraftlinjer i seksjon 6 er 2.5 km
- Feilfrekvens på kraftlinjer er 0.0371 [avbrudd/km år] [24]
- Alle nettstasjoner antas å være av typen “Nettstasjon med transformator i mast”
- Fordelingstransformatorene i nettstasjonene er alle 200 kVA
  - $P_{ref}$  antas å være tilnærmet lik 200 kW ( $P_{max}$ ) for alle lastpunkter
  - Mildere effekt ( $P_{mildere}$ ) antas å være 100 kW for alle lastpunkter
- Hvert lastpunkt har 250 sluttbrukere
- Feilsøking utføres ved befaringslang langs kraftlinjer
  - Montør starter feilsøking fra siste seksjoneringspunkt
  - Veg stopper ved nettstasjon LS5
  - Ved feilsøking i seksjon 1 må skillebryter ( $B_2$ ) åpnes for synlig skille
- Lastskillebryter ( $LS_6$ ) representerer mulighet for reservemating fra annen radial
  - Lastskillebryter ( $LS_6$ ) er fjernstyrt
  - Reservemating kobles ikke inn før feil er isolert, slik at feil ikke forplantes

Hver seksjon i luftnett-modellen består av to nettstasjoner med ulik kundesammensetning. Tabell 8.1 viser den totale prosentvise kundesammensetningen i hver seksjon i luftnett-modellen.

Kundegrupper	Prosentvis kundesammensetning i seksjoner [%]					
	Seksjon 1	Seksjon 2	Seksjon 3	Seksjon 4	Seksjon 5	Seksjon 6
Husholdning	40	40	40	50	50	100
Handel	20	10	0	0	0	0
Jordbruk	0	10	20	30	50	0
Industri	40	40	40	20	0	0
Offentlig virksomhet	0	0	0	0	0	0
Kraftintensiv industri	0	0	0	0	0	0

**Tabell 8.1:** Kundesammensetning i seksjoner i luftnett-modell

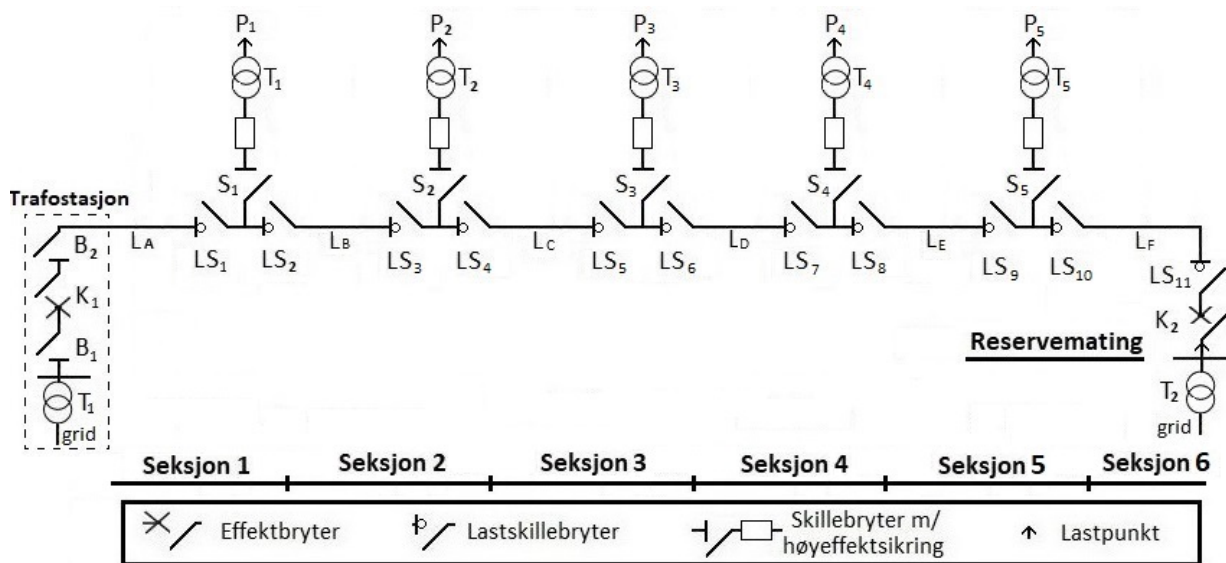
Basert på kundesammensetningen og belastningen i hver seksjon er de gjennomsnittlige KILE-satsene beregnet. KILE-satsene er svært sentrale, spesielt for seksjoneringsmetodikkene *halvering av KILE-satser* og *halvering av forventet KILE*. De gjennomsnittlige KILE-satsene er produktet av de spesifikke avbruddskostnadene ( $K_{p,ref}$ ) og belastningen ( $P_{mildere}$ ) i hver seksjon. De spesifikke avbruddskostnadene er beregnet ved hjelp av kostnadsfunksjonene fra tabell 2.1 og vektet med hensyn på kundesammensetning etter likning 2.2. For enkelhetsskyld er avbruddsvarighet( $r$ ) lik 1 time benyttet. Tabell 8.2 viser de gjennomsnittlige KILE-satsene i luftnett-modellen.

Seksjoner	Gjennomsnittlig KILE-satser i seksjoner [NOK]					
	Seksjon 1	Seksjon 2	Seksjon 3	Seksjon 4	Seksjon 5	Seksjon 6
<b>KILE-satser</b>	8266.2	6736.9	5207.6	3968.4	2884.3	2109.1

**Tabell 8.2:** Gjennomsnittlig KILE-satser i seksjoner i luftnett-modell

## 8.2 Kabelnett-modell

Kabelnett-modellen representerer et forenklet 11 kV kabelnett i tettbygd strøk uten avgreninger, se figur 8.2. Radialen driftes radielt og forsynes fra transformatorstasjonen, men har en alternativ forsyningsvei i enden av radialen ved å lukke den fjernstyrte lastskillebryteren ( $LS_{11}$ ). Totalt sett består nettmodellen av fem nettstasjoner som transformerer ned spenningen og forsyner sluttbrukere ( $P_n$ ) i det lavspente distribusjonsnettet. Radialen er sammenkoblet av seks kabelstrekninger ( $L_n$ ) bestående av høyspennings kraftkabler av ulike lengder. Modellen er også delt inn i seks ulike seksjoner ved hjelp av de manuelle lastskillebryterne ( $LS_n$ ) som er plassert langs radialen. Disse bryterne muliggjør seksjonering av nettet for lokalisering og isolering av feil, samt forsyning av friskt nett via reservemating. I motsetning til luftnett kan feilbefengt kabelstrekning isoleres uten at lastpunkter blir strømløse.



Figur 8.2: Representasjon av kabelnett-modell

### 8.2.1 Nettspesifikasjon for kabelnett-modell

- Kabelstrekninger i de ulike seksjonene har ulike lengder
  - Kraftkabel i seksjon 1 er 1000 meter
  - Kraftkabel i seksjon 2 er 700 meter
  - Kraftkabel i seksjon 3 er 500 meter
  - Kraftkabel i seksjon 4 er 400 meter
  - Kraftkabel i seksjon 5 er 300 meter
  - Kraftkabel i seksjon 6 er 300 meter
- Feilfrekvens på kraftkabler er 0.05 [avbrudd/km år]
- Alle nettstasjoner antas å være av typen “Trafokiosk med åpent anlegg”
- Fordelingstransformatorene i nettstasjonene er alle 800 kVA
  - $P_{ref}$  antas å være tilnærmet lik 800 kW ( $P_{max}$ ) for alle lastpunkter
  - Mildere effekt ( $P_{mildere}$ ) antas å være 500 kW for alle lastpunkter

- Hvert lastpunkt har 120 sluttbrukere
- Feilsøking utføres ved forlokalisering og punktnøyaktig feillokalisering
  - Reparasjonstid er ikke inkludert i pålitelighetsberegninger da forsyning til alle lastpunkter gjenoprettes før reparasjon utføres
- Lastskillebryter ( $LS_{11}$ ) representerer mulighet for reservemating fra annen radial
  - Lastskillebryter ( $LS_{11}$ ) er fjernstyrt
  - Reservemating kobles ikke inn før feil er isolert

I kabelnett er kundene med høyest spesifikke avbruddskostnader typisk lokalisert i tettbygd strøk eller bykjerne lengre ut på radial. Tabell 8.3 viser den prosentvise kundesammensetningen i hver nettstasjon i kabelnett-modellen.

Kundegrupper	Prosentvis kundesammensetning i lastpunkter[%]				
	Lastpkt. 1	Lastpkt. 2	Lastpkt. 3	Lastpkt. 4	Lastpkt. 5
Husholdning	60	50	40	20	10
Handel	20	40	50	60	70
Jordbruk	0	0	0	0	0
Industri	10	0	0	0	0
Offentlig virksomhet	10	10	10	20	20
Kraftintensiv industri	0	0	0	0	0

**Tabell 8.3:** Kundesammensetning i lastpunkter i kabelnett-modell

I likhet med luftnett-modellen er de gjennomsnittlig KILE-satsene beregnet med en avbruddsvarighet ( $r$ ) lik 1 time, se tabell 8.4. KILE-satsene er sentrale for seksjoneringsmetodikkene *halvering av KILE-satser* og *halvering av forventet KILE*.

Lastpunkter	Gjennomsnittlig KILE-satser i lastpunkter [NOK]				
	Lastpunkt 1	Lastpunkt 2	Lastpunkt 3	Lastpunkt 4	Lastpunkt 5
<b>KILE-satser</b>	18204.5	24883.4	29094.2	36072.4	40283.2

**Tabell 8.4:** Gjennomsnittlig KILE-satser i lastpunkter i kabelnett-modell

---

## 8.3 Forutsetninger

Pålitelighetsanalysene i denne oppgaven inneholder en rekke forenklinger og forutsetninger vedrørende nettmodeller, seksjonering, seksjoneringsmetodikker og reservemating. Følgende antagelser er benyttet i pålitelighetsberegningene:

### Generelt:

- Antar ingen transmisjonsbegrensninger ved innkobling av laster
- Strømnettet driftes radielt
- Informasjon om ytre påvirkninger er neglisjert
- Alle kunde grupper prioriteres likt
- Feilrettingsmannskap består av kun én montør

### Feil, seksjonering og reservemating:

- Ser kun på enkeltfeil som forekommer på kraftlinjer og kabelstrekninger
  - Feil antas å oppstå midt på kraftlinjer og kabelstrekninger
- Pålitelighetsanalysene inkluderer kun varige feil
- Kun én feil kan oppstå om gangen, og denne må rettes før neste feil kan oppstå
- Alle brytere og transformatorer antas å være 100% pålitelige
  - Feil på brytere og transformatorer i nettstasjon og transformatorstasjon neglisjeres
- Bil blir benyttet som transportmiddel under manuell seksjonering
- Feilsøking på kraftlinjer utføres ved befarings til fots
  - Montør starter feilsøking fra siste seksjoneringspunkt
- Montør og operatør arbeider parallelt ved fjernstyrte koblinger
  - Når feil er isolert og operatør utfører fjernstyrt kobling av effektbryter eller reservemating vil montør fortsette seksjoneringen parallelt i stedet for å vente til koblingen er utført

### Seksjoneringsmetodikk:

- Hvis to brytere tilfredsstiller krav til seksjoneringsmetodikk benyttes to ulike sekundærkriterier til å velge neste seksjoneringspunkt
  - Sekundærkriteriet - Nærmeste nettstasjon
    - \* Seksjonerer bryteren som er lokalisert nærmest forrige seksjoneringspunkt
  - Sekundærkriteriet - Sannsynlighet for innkobling mot varig feil
    - \* Seksjonerer bryteren som minimerer sannsynligheten for innkobling mot feil
- For prøvekoblinger og isolasjonsmålinger i kabelnett antas det at nedstrøms (bakomliggende) bryter i nettstasjon velges som seksjoneringspunkt med mindre seksjoneringsmetodikk eller sekundærkriteriet tilsier at oppstrøms (foranliggende) bryter skal velges

---

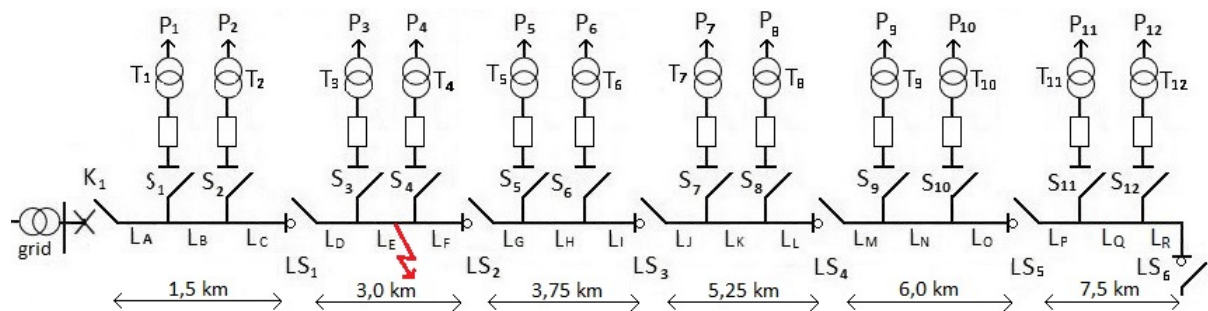
## 8.4 Feilhåndteringstider

For at tidsforløpet ved feilhåndteringen skal være så reelt som mulig er feilrettingsprosessen delt inn i responstid, utrykningstid, koblingstid, oppstartstid, kjøretid og reparasjonstid. Responstid er definert som tiden det tar fra feilen oppstår til seksjoneringen starter. I responstiden inngår operatør sine nødvendige vurderinger før første seksjoneringspunkt velges, samt varsling til montører. Montører antas å bli varslet 30 sekunder etter feil er inntruffet, og vil i løpet av resterende responstid klargjøre seg til utrykning. Utrykningstid er tiden fra operatør melder ifra om feil til montør er klar å utføre første manuelle kobling på utvalgt seksjoneringspunkt. Tiden representerer en gjennomsnittlig reisetid for montører til et vilkårlig seksjoneringspunkt, da det ikke er definert hvor montører er lokalisert. Utrykningstiden vil løpe parallelt med responstiden og eventuell fjernstyrt seksjonering anført av operatør på nettsentral. Tiden fra feil oppstår til montør er lokalisert ved første seksjoneringspunkt kan med andre ord defineres som (utrykningstid + 30s). Koblingstiden er definert som tiden det tar å koble en bryter. For fjernstyrte brytere tilsvarer dette selve bryterkoblingen, mens for manuelle brytere inkluderer dette tiden fra montør ankommer nettstasjonen til bryteren er ferdig koblet. Kommunikasjon mellom operatør og montør for sikker betjening inngår i koblingstidene. I kabelnett hvor isolasjonsmålinger benyttes er meggetid gjeldende. Meggetiden representerer til- og frakobling av måleutstyr og jording. Tiden montør bruker på transport er delt inn i to kategorier, oppstartstid og kjøretid. Oppstartstiden er et fastledd som legges til hver gang montør skal kjøre fra en nettstasjon til en annen. Fastleddet inkluderer tiden montør bruker på å forlate nettstasjon og gjøre seg klar til å kjøre videre til neste nettstasjon. Kjøretiden er tiden montør bruker på å kjøre fra en nettstasjon til en annen med en gjennomsnittlig kjørehastighet på 50 km/t. Kjøretiden er derfor avhengig av avstanden mellom hvert seksjoneringspunkt. Etter at seksjoneringen er utført og feil er isolert starter reparasjonstiden. Reparasjonstiden er tiden fra feilbefengt seksjon er isolert til feilbefengt anleggsdel er funnet og enhetens funksjon er gjenopprettet og driftsklar. Følgende verdier er benyttet for feilhåndteringstider:

- Responstid
  - Responstiden er 2 minutter
- Utrykningstid
  - Utrykningstiden er 20 minutter
- Koblingstid
  - Manuell kobling (montør) er 2 minutter
  - Fjernstyrt kobling (operatør) er 30 sekunder
  - Meggetid av luftisolert anlegg (montør) er 20 minutter
- Oppstartstid
  - Oppstartstiden er 2 minutter
- Reisetid
  - Kjørehastighet i luftnett-modell er 50 km/t
  - Kjørehastighet i kabelnett-modell er 25 km/t
- Reparasjonstid
  - Reparasjon av kraftlinjer består av befaring og reparasjon (ganghastighet : 3.5 km/t)
    - \* Reparasjon er satt til 2,5 timer

## 8.5 Beskrivelse av seksjoneringsforløp

For å gi bedre forståelse av de ulike seksjoneringsmetodikkene er det valgt å illustrere eksempler av seksjoneringsforløpet ved avbrudd for både luftnett- og kabelnett-modellen. Seksjoneringsforløpene er illustrert ved hjelp av hendelsestrær, og baserer seg på seksjoneringsmetodikkene beskrevet i delkapittel 6.2 og delkapittel 6.3, samt feilhåndteringstidene fra delkapittel 8.4. Hendelsestreet gir detaljerte beskrivelser av stegene i feilrettingsforløpet, og viser hvilke lastpunkter som til enhver tid er påvirket av feil. Figur 8.4 illustrerer seksjoneringsforløpet ved feil på kraftlinje ( $L_E$ ) i luftnett-modellen når seksjoneringsmetodikken *halvering av antall nettstasjoner* med sekundærkriteriet *nærmeste nettstasjon* benyttes. Liknende eksempel av seksjoneringsforløp for de resterende seksjoneringsmetodikkene er vedlagt i vedlegg B.



Figur 8.3: Illustrasjon av luftnett-modell

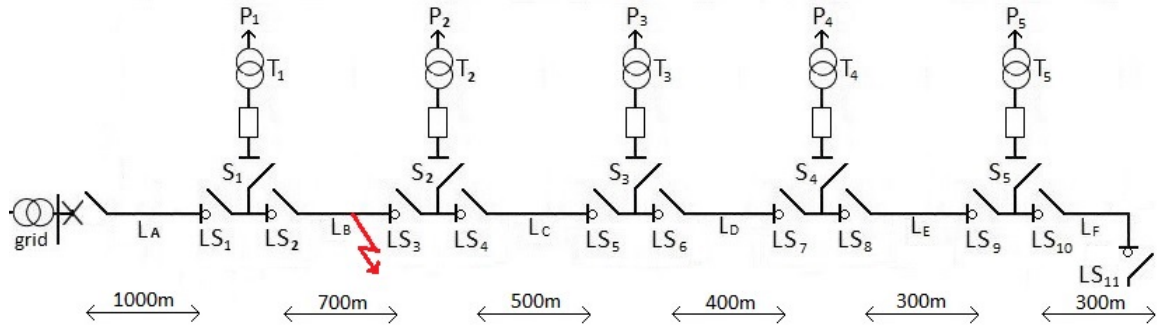
Primærfeil på linje ( $L_E$ )	
Effektbryter (K1) løser ut	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8, P9, P10, P11, P12]
GIK av (K1)	Avbrudd = []
Effektbryter (K1) løser ut	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8, P9, P10, P11, P12]
Responstid	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8, P9, P10, P11, P12]
Utrykningstid	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8, P9, P10, P11, P12]
Lastbryter (LS3) åpnes	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8, P9, P10, P11, P12]
Effektbryter (K1) lukkes	Avbrudd = [P7, P8, P9, P10, P11, P12]
Effektbryter (K1) løser ut	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8, P9, P10, P11, P12]
Reservemating (LS6) lukkes	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4, P5, P6]
Reisetid til lastbryter (LS2)	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4, P5, P6]
Lastbryter (LS2) åpnes	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4, P5, P6]
Effektbryter (K1) lukkes	Avbrudd = [P5, P6]
Effektbryter (K1) løser ut	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4, P5, P6]
Reisetid til lastbryter (LS3)	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4, P5, P6]
Lastbryter (LS3) lukkes	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4]
Reisetid til lastbryter (LS1)	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4]
Lastbryter (LS1) åpnes	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4]
Effektbryter (K1) lukkes	Avbrudd = [P3, P4]
Befaring av kraftlinje	Avbrudd = [P3, P4]
Reparasjon av linje ( $L_E$ )	Avbrudd = [P3, P4]
Lastbryter (LS1) lukkes	Avbrudd = []

Figur 8.4: Eksempel på seksjoneringsforløp for *halvering av antall nettstasjoner* med sekundærkriteriet *nærmeste nettstasjon* i luftnett

Figuren illustrerer arbeidet med å lokalisere og isolere feil, samt hvilke lastpunkter som opplever avbrudd eller raske inn- og utkoblinger av effektbryter som følge av innkoblinger mot stående feil, såkalt *blinking*. Etterhvert som feilområdet reduseres forsynes friskt nett via reservemating ved at montør reiser rundt og seksjonerer nettet manuelt.



Seksjoneringsforløpet for metodikken *halvering av antall nettstasjoner* med sekundærkriteriet *nærmeste nettstasjon* er også illustrert ved hjelp av hendelsestrær i kabelnett-modellen. Feilbefengt komponent er derimot i dette tilfellet kabelstrekning ( $L_B$ ), se figur 8.5. Siden både prøvekoblinger og isolasjonsmålinger benyttes til å seksjonere kabelnett gir dette to ulike seksjoneringsforløp. Liknende eksempel av seksjoneringsforløp for de resterende seksjoneringsmetodikkene er vedlagt i vedlegg C.



**Figur 8.5:** Illustrasjon av kabelnett-modell

Figur 8.6 viser seksjoneringsforløpet ved bruk av prøvekoblinger. På samme vis som luftnett-modellen vil friskt nett nedstrøms feil gjenopprette kontinuerlig forsyning via reservemating. Eksempelet viser at det blir utført totalt tre prøvekoblinger før feil isoleres, hvor to av dem er innkoblinger mot varig feil. Den største forskjellen på kabelnett i forhold til luftnett er at alle lastpunkter gjenoppretter forsyningen før reparasjon av feilbefengt komponent iverksettes. Det er derfor ikke like kritisk å få reparert feilbefengt komponenter i kabelnett som i luftnett.

Primærfeil på kabelstrekning ( $L_B$ )	
Effektbryter (K1) løser ut	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4, P5]
Responstid	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4, P5]
Utrykningstid	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4, P5]
Lastbryter (LS6) åpnes	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4, P5]
Effektbryter (K1) lukkes	Avbrudd = [P4, P5]
Effektbryter (K1) løser ut	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4, P5]
Reservemating (LS11) lukkes	Avbrudd = [P1, P2, P3]
Montør inspiserer NS3	Avbrudd = [P1, P2, P3]
Lastbryter (LS5) åpnes	Avbrudd = [P1, P2, P3]
Lastbryter (LS6) lukkes	Avbrudd = [P1, P2]
Reisetid til NS2	Avbrudd = [P1, P2]
Lastbryter (LS3) åpnes	Avbrudd = [P1, P2]
Effektbryter (K1) lukkes	Avbrudd = []
Effektbryter (K1) løser ut	Avbrudd = [P1, P2]
Reisetid til NS3	Avbrudd = [P1, P2]
Lastbryter (LS5) lukkes	Avbrudd = [P1]
Reisetid til NS1	Avbrudd = [P1]
Lastbryter (LS2) åpnes	Avbrudd = [P1]
Effektbryter (K1) lukkes	Avbrudd = []
Reparasjon av kabel ( $L_B$ )	Avbrudd = []

**Figur 8.6:** Eksempel på seksjoneringsforløp ved bruk av prøvekoblinger for *halvering av antall nettstasjoner* med sekundærkriteriet *nærmeste nettstasjon* i kabelnett

Figur 8.7 viser seksjoneringsforløpet ved bruk av isolasjonsmålinger. Forskjellen ved bruk av isolasjonsmålinger kontra prøvekoblinger er at lastpunkter oppstrøms feil også vil gjenopprette kontinuerlig forsyningen da effektbryteren ikke benyttes til å utføre prøvekoblinger. Dette illustreres ikke i figur 8.6 og figur 8.7, men dersom en sammenligner seksjoneringsforløpene fra figur C15 og figur C16 i vedlegg B illustreres dette godt. En annen viktig ting å påpeke er at hendelsestreet ikke sier noe om tidsaspektet. Selv om figur 8.6 og figur 8.7 ser relativt like ut, er isolasjonsmålinger en mye mer tidkrevende seksjoneringsmetode enn prøvekoblinger.

Primærfeil på kabelstrekning (L <sub>B</sub> )	
Effektbryter (K1) løser ut	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4, P5]
Responstid	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4, P5]
Utrykningstid	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4, P5]
Lastbryter (LS6) åpnes	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4, P5]
Megger tilkobles (LS6)	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4, P5]
Lastbryter (LS5) åpnes	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4, P5]
Lastbryter (LS6) lukkes	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4, P5]
Megger frakobles (LS6)	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4, P5]
Reservemåting (LS11) lukkes	Avbrudd = [P1, P2]
Reisetid til NS2	Avbrudd = [P1, P2]
Lastbryter (LS3) åpnes	Avbrudd = [P1, P2]
Megger tilkobles (LS4)	Avbrudd = [P1, P2]
Megger frakobles (LS4)	Avbrudd = [P1, P2]
Reisetid til NS3	Avbrudd = [P1, P2]
Lastbryter (LS5) lukkes	Avbrudd = [P1]
Reisetid til NS1	Avbrudd = [P1]
Lastbryter (LS2) åpnes	Avbrudd = [P1]
Megger tilkobles (LS2)	Avbrudd = [P1]
Megger frakobles (LS2)	Avbrudd = [P1]
Effektbryter (K1) lukkes	Avbrudd = []
Reparasjon av kabel (L <sub>B</sub> )	Avbrudd = []

**Figur 8.7:** Eksempel på seksjoneringsforløp ved bruk av megging for *halvering av antall nettstasjoner* med sekundærkriteriet *nærmeste nettstasjon* i kabelnett

## 9 | Illustrasjon av fremgangsmetode

*Pålitelighetsanalysene utført på luftnett- og kabelnett-modellen baserer seg på bruk av RELRAD-metoden. For å gi et komplekst bilde av påliteligheten i nettmodellene ved bruk av ulike seksjoneringsmetodikker er de forventede kunde- og energiorienterte pålitelighetsindeksene  $P_{avbrutt}$ , ILE, SAIDI, ASAI og KILE beregnet. Avbruddsvarigheter, antall innkoblinger mot varig feil og diverse forventningsverdier er også beregnet for å beskrive påliteligheten. I følgende kapittel blir det gitt detaljerte beskriver av fremgangsmetoden benyttet i pålitelighetsanalysene. For å illustrere fremgangsmetoden er det brukt eksempler fra resultatene av **luftnett-modellen** gitt seksjoneringsmetodikken **halvering av antall nettstasjoner** med sekundærkriteriet **nærmeste nettstasjon**. Resultater fra de resterende seksjoneringsmetodikkene for begge nettmodellene er systematisert og tabulert i vedlegg D og vedlegg E.*

### 9.1 Gjennomsnittlig avbruddsvarigheter

Basert på seksjoneringsmetodikkene fra delkapittel 6.2 og delkapittel 6.3, samt feilhåndterings-tidene fra delkapittel 8.4 er seksjoneringsforløpet for hver metodikk utarbeidet. Eksempler på seksjoneringsforløp er illustrert ved hjelp av hendelsestrær i delkapittel 8.5. Ved å kombinere seksjoneringsforløpene med feilhåndteringstider er gjennomsnittlig avbruddsvarighet for hvert lastpunkt gitt feilende komponent beregnet, se tabell 9.1. Tabellen kan leses av på følgende vis; feil på kraftlinje ( $L_A$ ) medfører at lastpunkter i seksjon 1 i snitt gjenoppretter kontinuerlig forsyning etter 4.243 timer. Lastpunkter i seksjon 2 vil med feil på kraftlinje ( $L_A$ ) i snitt være strømløse i 1.012 timer før kontinuerlig strømforsyning gjenoprettes. Tabellen viser at det tar lengst tid å gjenopprette forsyningen i lastpunkter i seksjon 1 for gitt seksjoneringsmetodikk. I luftnett-modellen blir de gjennomsnittlige avbruddsvarighetene referert til seksjoner, da alle lastpunkter i samme seksjon har lik avbruddsvarighet. I kabelnett refereres det derimot til avbruddsvarigheter for hvert lastpunkt.

Feilende Komp.	Gjennomsnittlig avbruddsvarighet ( $r$ ) for seksjoner [timer]					
	Seksjon 1	Seksjon 2	Seksjon 3	Seksjon 4	Seksjon 5	Seksjon 6
$L_A$	4.243	1.012	0.675	0.392	0.392	0.392
$L_B$	4.529	1.012	0.675	0.392	0.392	0.392
$L_C$	4.017	1.012	0.675	0.392	0.392	0.392
$L_D$	0.885	3.704	0.675	0.392	0.392	0.392
$L_E$	0.885	4.275	0.675	0.392	0.392	0.392
$L_F$	0.885	4.275	0.675	0.392	0.392	0.392
$L_G$	0.533	0.533	3.424	0.392	0.392	0.392
$L_H$	0.533	0.533	4.138	0.392	0.392	0.392
$L_I$	0.533	0.533	4.138	0.392	0.392	0.392
$L_J$	0.785	0.785	0.785	3.818	0.613	0.613
$L_K$	0.785	0.785	0.785	4.818	0.613	0.613
$L_L$	0.785	0.785	0.785	4.818	0.613	0.613
$L_M$	1.037	1.037	1.037	1.037	4.141	0.850
$L_N$	1.037	1.037	1.037	1.037	5.284	0.850
$L_O$	1.037	1.037	1.037	1.037	5.284	0.850
$L_P$	0.842	0.842	0.842	0.842	0.842	3.707
$L_Q$	0.842	0.842	0.842	0.842	0.842	4.421
$L_R$	0.842	0.842	0.842	0.842	0.842	5.136
Totalt	25.03	24.88	23.74	22.62	22.60	21.18

**Tabell 9.1:** Gjennomsnittlig avbruddsvarighet ( $r$ ) i seksjoner

Selv om tabell 9.1 illustrerer den gjennomsnittlige avbruddsvarigheten i hver seksjon, sier dette ingenting om forventet avbruddsvarighet da feilsannsynligheten ikke er inkludert. Feilsannsynlighet er en funksjon av feilfrekvens og lengder av kraftlinjer/kraftkabler, og siden feilfrekvensene er konstante verdier vil feilsannsynligheten være proporsjonal med lengdene. Tabell 9.2 viser årlig forventet avbruddsvarighet i de ulike seksjonene i luftnett-modellen. Årlig forventet avbruddsvarighet i et lastpunkt for gitt feilende komponent er beregnet ved hjelp av likning 3.2. De årlige forventningsverdiene for hver seksjon fra tabell 9.2 finnes ved å summere de årlige forventede avbruddsvarighetene for alle feilende komponenter i hvert lastpunkt. Deretter summeres verdiene for alle lastpunkter i samme seksjon.

Seksjoner Varighet	Årlig forventet avbruddsvarighet i seksjoner [timer/år]					
	Seksjon 1	Seksjon 2	Seksjon 3	Seksjon 4	Seksjon 5	Seksjon 6
	1.028	1.203	1.273	1.458	1.565	1.659

**Tabell 9.2:** Årlig forventet avbruddsvarighet i seksjoner

## 9.2 Innkoblinger mot varige feil

Prøvekoblinger fører til at deler av strømmettet blir utsatt for innkoblinger mot varige feil. Innkoblinger mot feil gir store feilstrømmer som fører til elektrisk og mekanisk stress av komponenter som kraftkabler, brytere og fordelingstransformatorer. Tabell 9.3 viser antall innkoblinger mot varige feil for gitt feilende komponenter, og er beregnet ut fra seksjoneringsforløpene. Tabellen kan leses av på følgende vis; feil på kraftlinje ( $L_A$ ) medfører at komponenter i seksjon 1 bli utsatt for totalt tre innkoblinger mot feil. Komponenter i seksjon 2 og seksjon 3 blir utsatt for henholdsvis to og en innkobling mot feil. Totalt sett utføres det tre innkoblinger mot varig feil, men kun seksjon 1 blir påvirket av alle tre da feilområdet reduseres underveis i seksjoneringen. Etterhvert som feilområdet reduseres vil også impedansen minke, noe som gir større feilstrømmer.

Feilende Komp.	Antall innkoblinger mot varig feil i seksjoner [-]					
	Seksjon 1	Seksjon 2	Seksjon 3	Seksjon 4	Seksjon 5	Seksjon 6
$L_A$	3	2	1	0	0	0
$L_B$	3	2	1	0	0	0
$L_C$	3	2	1	0	0	0
$L_D$	2	2	1	0	0	0
$L_E$	2	2	1	0	0	0
$L_F$	2	2	1	0	0	0
$L_G$	1	1	1	0	0	0
$L_H$	1	1	1	0	0	0
$L_I$	1	1	1	0	0	0
$L_J$	1	1	1	1	0	0
$L_K$	1	1	1	1	0	0
$L_L$	1	1	1	1	0	0
$L_M$	1	1	1	1	1	0
$L_N$	1	1	1	1	1	0
$L_O$	1	1	1	1	1	0
$L_P$	0	0	0	0	0	0
$L_Q$	0	0	0	0	0	0
$L_R$	0	0	0	0	0	0
Totalt	24	21	15	6	3	0

**Tabell 9.3:** Antall innkoblinger mot varig feil i seksjoner

I likhet med forventningsverdien for årlig avbruddsvarighet kan en ved hjelp av likning 3.2 beregne en forventningsverdi for årlig antall innkoblinger mot varige feil i hver seksjon. Tabell 9.4 viser årlig antall forventede innkoblinger mot varige feil. Alle komponenter i samme seksjon vil bli utsatt for like mange og store feilstrømmer. Tabellen kan avleses på følgende vis; Alle komponenter i seksjon 1 er forventet å bli utsatt for 0.946 årlige innkoblinger mot varig feil.

Seksjoner	Årlig forventet antall innkoblinger mot varig feil [antall/år]					
	Seksjon 1	Seksjon 2	Seksjon 3	Seksjon 4	Seksjon 5	Seksjon 6
Antall	0.946	0.890	0.723	0.417	0.223	0.00

**Tabell 9.4:** Årlig forventet antall innkoblinger mot varig feil i seksjoner

### 9.3 Pålitelighetsindekser

Med utgangspunkt i de gjennomsnittlige avbruddsvarighetene er de spesifikke avbruddskostnadene for hvert lastpunkt beregnet etter kostnadsfunksjonene fra tabell 2.1. De spesifikke avbruddskostnadene er sammen med feilfrekvenser og mildere effekt i hvert lastpunkt benyttet til å beregne de årlige forventede KILE-kostnadene etter likning 2.3. Tabell 9.5 viser de forventede KILE-kostnadene for hvert lastpunkt i luftnett-modellen. Tabellen kan leses av på følgende vis; feil på kraftlinje ( $L_A$ ) medfører en årlig forventet avbruddskostnad for lastpunkt P1 lik 458 NOK. Lastpunkt P1 vil med denne seksjoneringsmetodikken totalt sett ha en årlig forventet KILE-kostnad lik 8175 NOK. Ved å summere alle de totale forventede avbruddskostnadene for hvert lastpunkt får en nettmodellens totale forventede avbruddskostnad, som i dette tilfellet er 70084 NOK. Alle avbruddskostnadene er avrundet til nærmeste hele krone.

Feilende Komp.	Forventet KILE-kostnader for lastpunkter [NOK]											
	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$	$P_5$	$P_6$	$P_7$	$P_8$	$P_9$	$P_{10}$	$P_{11}$	$P_{12}$
$L_A$	458	458	126	126	74	74	39	39	28	28	18	18
$L_B$	486	486	126	126	74	74	39	39	28	28	18	18
$L_C$	436	436	126	126	74	74	39	39	28	28	18	18
$L_D$	279	279	699	699	147	147	79	79	56	56	35	35
$L_E$	279	279	790	790	147	147	79	79	56	56	35	35
$L_F$	279	279	790	790	147	147	79	79	56	56	35	35
$L_G$	241	241	200	200	679	679	99	99	70	70	44	44
$L_H$	241	241	200	200	803	803	99	99	70	70	44	44
$L_I$	241	241	200	200	803	803	99	99	70	70	44	44
$L_J$	446	446	366	366	286	286	828	828	131	131	89	89
$L_K$	446	446	366	366	286	286	1005	1005	131	131	89	89
$L_L$	446	446	366	366	286	286	1005	1005	131	131	89	89
$L_M$	627	627	512	512	397	397	303	303	785	785	135	135
$L_N$	627	627	512	512	397	397	303	303	983	983	135	135
$L_O$	627	627	512	512	397	397	303	303	983	983	135	135
$L_P$	672	672	550	550	429	429	325	325	236	236	672	672
$L_Q$	672	672	550	550	429	429	325	325	236	236	797	797
$L_R$	672	672	550	550	429	429	325	325	236	236	923	923
<b>Totalt</b>	8175	8175	7541	7541	6284	6284	5373	5373	4314	4314	3355	3355

**Tabell 9.5:** Forventede KILE-kostnader

De årlige forventede pålitelighetsindeksene  $P_{avbrutt}$ , ILE, SAIDI og ASAI gir et mer komplekst bilde av påliteligheten til nettmodellene. Pålitelighetsindeksene er beregnet ved hjelp av likninger presentert i delkapittel 3.2.1 og delkapittel 3.2.2. Tabell 9.6 viser de årlige pålitelighetsindeksene i luftnett-modellen for gitt seksjoneringsmetodik.

Pålitelighetsindekser	
$P_{Avbrutt}$ [kW/år]	1202.0
ILE [kWh/år]	1637.2
SAIDI [min/år]	81.8617
ASAI [-]	0.999844
KILE [NOK/år]	70084 ,-

**Tabell 9.6:** Pålitelighetsindekser for gitt seksjoneringsmetodik

## 10 | Resultater

*I følgende kapittel blir en oppsummering av de viktigste resultatene fra pålitelighetsanalysene presentert. Alle pålitelighetsanalysene av luftnett- og kabelnett-modellen er beregnet i Excel-regnearket "Beregninger\_master.xlsx" i henhold til beskrivelser gitt i kapittel 9. Excel-filen er vedlagt elektronisk, men komplette resultater av hver enkelt seksjoneringsmetodikk er systematisert og tabulert i vedlegg D og vedlegg E.*

Videre i oppgaven er det valgt å benytte en forenklet og plassbesparende framstilling av sekundærkriteriene *nærmeste nettstasjon* og *sannsynlighet for innkobling mot varig feil* ved å referere til tallverdier. Følgende tallverdier representerer sekundærkriteriene:

- 1**    **Sekundærkriteriet *nærmeste nettstasjon***
- 2**    **Sekundærkriteriet *sannsynlighet for innkobling mot varig feil***

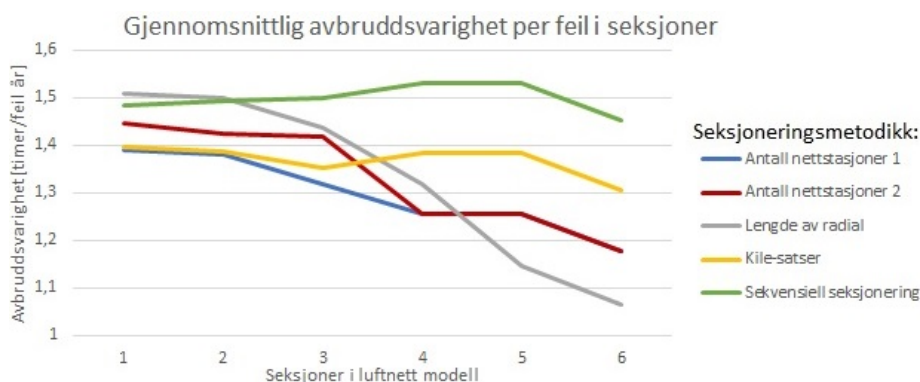
*Eksempelvis vil seksjoneringsmetodikken "halvering av antall nettstasjoner 1" representere metodikken halvering av antall nettstasjoner med sekundærkriteriet *nærmeste nettstasjon*.*

## 10.1 Luftnett-modell

I luftnett-modellen vil seksjoneringsmetodikken *halvering av antall nettstasjoner* i enkelte tilfeller gi to brytere som tilfredsstillt kravene om halvering. Sekundærkriteriene “*nærmeste nettstasjon*” og “*sannsynlighet for innkobling mot varig feil*” er derfor benyttet for å skille metodikken. På grunn av strukturen av luftnett-modellen og symmetrien i nettspesifikasjonene vil følgende seksjoneringsmetodikker gi likt seksjoneringsforløp:

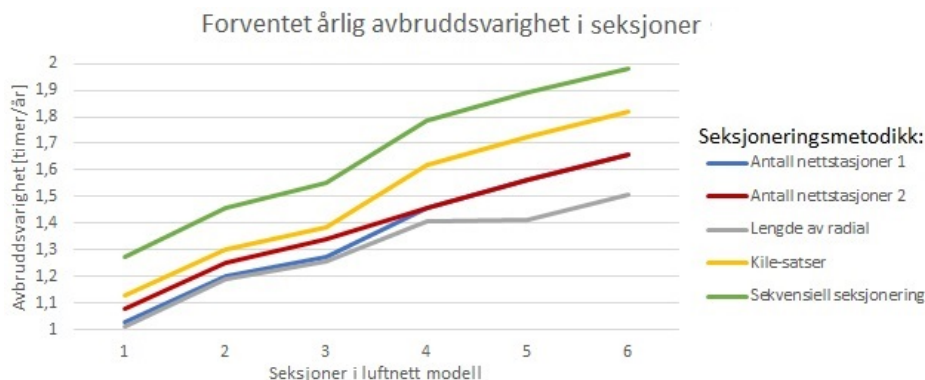
- halvering av lengde av radial - halvering av feilfrekvens
- halvering av antall nettstasjoner 1 - halvering av forventet KILE

Figur 10.1 illustrerer de gjennomsnittlige avbruddsvarighetene per feil i hver seksjon. Figuren viser at avbruddsvarigheten minker langs radialen for de fleste metodikkene. Årsaken til dette er at oppstrøms lastpunkter ikke gjenoppretter kontinuerlig forsyning før feil er isolert mellom to nærliggende brytere, da effektbryter benyttes til å utføre prøvekoblinger. For lastpunkter nedstrøms feil vil derimot reservemating kunne tilkobles fortløpende. Figur 10.1 viser at metodikken *halvering av lengde av radial* gir høyest gjennomsnittlig avbruddsvarighet for de to første seksjonene, men lavest for de to siste. I de fire første seksjonene er det metodikken *halvering av antall nettstasjoner 1* som gir lavest gjennomsnittlig avbruddsvarighet, mens i de fire siste seksjonene gir *sekvensiell seksjonering* klart høyest avbruddsvarighet.



Figur 10.1: Gjennomsnittlig avbruddsvarighet per feil for luftnett-modell

Selv om figur 10.1 viser at gjennomsnittlig avbruddsvarighet er lavest ytterst på radialen, er de årlige forventede avbruddsvarighetene høyest, se figur 10.2. Årsaken til dette er at feilsannsynligheten øker langs radialen da lengden av kraftlinjene øker. Figur 10.2 viser at *sekvensiell seksjonering* gir høyest forventningsverdi for alle seksjoner, mens metodikken *halvering av lengde av radial* lavest.



Figur 10.2: Årlig forventet avbruddsvarighet for luftnett-modell



En oppsummering av resultatene av pålitelighetsanalysene i luftnett-modellen er vist i tabell 10.1 og tabell 10.2. Tabell 10.1 viser at seksjoneringsmetodikken *halvering av lengde av radial* gir klart best pålitelighetsindekser. Årlig forventet ILE og årlig forventet avbruddskostnader er henholdsvis 4.9% og 3.4% lavere enn for metodikken *halvering av antall nettstasjoner 1* som gir nest best pålitelighetsindekser. Ikke overraskende er det *sekvensiell seksjonering* som gir dårligst pålitelighet. Årlig forventet ILE er hele 27.7% høyere enn metodikken *halvering av lengde av radial*, mens de årlige forventede avbruddskostnadene er 21.3% høyere.

Intuitivt vil en kanskje forvente at metodikken *halvering av forventet KILE* gir lavest avbruddskostnader. Dette er ikke tilfellet da feilfrekvensen øker langs radialen, noe som gir færrest antall avbrudd i seksjon 1 hvor KILE-kostnadene er størst. Feilfrekvensen og de spesifikke avbruddskostnadene er motstridende faktorer grunnet sammensetningen av topologi og KILE-fordeling. Ved å sammenligne endringene i feilfrekvens og spesifikke avbruddskostnader fremkommer det at feilfrekvensen er den dominerende faktoren i KILE-beregningene. Feilfrekvensen i seksjon 6 er 5 ganger større enn i seksjon 1, mens de spesifikke avbruddskostnadene er kun 3.4 ganger større i seksjon 1 i forhold til seksjon 6. Metodikken *halvering av lengde av radial* som gjenoppretter forsyningen raskest i bakre halvdel av nettmodellen gir derfor lavest avbruddskostnader.

<b>Seksjoneringsmetodikk</b>	<b>SAIDI [min/år]</b>	<b>ILE [kWh/år]</b>	<b>KILE [NOK/år]</b>
<i>Halveringsprinsippet:</i>			
Antall nettstasjoner 1	81.8617	1637.2	70084 ,-
Antall nettstasjoner 2	83.5071	1670.1	71660 ,-
lengde av radial	77.8540	1557.1	67698 ,-
KILE-satser	89.7540	1795.3	75412 ,-
Feilfrekvens <sup>1</sup>	77.8540	1557.1	67698 ,-
Forventet KILE <sup>2</sup>	81.8617	1637.2	70084 ,-
<i>Sekvensiell seksjonering</i>	99.4536	1989.1	82114 ,-

**Tabell 10.1:** Oppsummering av pålitelighetsindekser i luftnett-modell

<sup>1</sup>Likt seksjoneringsforløp som metodikken “halvering av lengde av radial”

<sup>2</sup>Likt seksjoneringsforløp som metodikken “halvering av antall nettstasjoner 1”

Selv om seksjoneringsmetodikken *halvering av lengde av radial* gir desidert lavest avbruddskostnader gir den klart størst forventningsverdi for innkobling mot varig feil, se tabell 10.2. Tabellen viser en oppsummering av forventningsverdiene for innkobling mot varig feil i alle seksjoner. Seksjon 1 vil selvsagt ha høyest forventningsverdi da seksjonen ligger nærmest transformatorstasjonen og inkluderes i de fleste prøvekoblinger. Lengre ut på radialen vil færre prøvekoblinger bli utført, og derav vil færre innkoblinger mot varig feil oppstå. *Sekvensiell seksjonering* er metodikken som gir lavest forventningsverdier med kun 0.723, 0.668 og 0.577 årlig forventet innkobling mot varig feil for henholdsvis seksjon 1, 2 og 3. Noe overraskende er det at metodikken *halvering av lengde av radial* gir såpass høye forventningsverdier sammenlignet med metodikken *halvering av antall nettstasjoner 1*. Forventningsverdiene er hele 32.3%, 34.4%, 42.5% og 73.4% større for henholdsvis seksjon 1, 2, 3 og 4.

Seksjoneringsmetodikk	Forventet årlig antall innkobling mot feil					
	Sek. 1	Sek. 2	Sek. 3	Sek. 4	Sek. 5	Sek. 6
<i>Halveringsprinsippet:</i>						
Antall nettstasjoner 1	0.946	0.890	0.723	0.417	0.223	0.000
Antall nettstasjoner 2	0.890	0.835	0.723	0.417	0.223	0.000
lengde av radial	1.252	1.196	1.030	0.723	0.223	0.000
KILE-satser	0.779	0.723	0.577	0.417	0.223	0.000
Feilfrekvens <sup>1</sup>	1.252	1.196	1.030	0.723	0.223	0.000
Forventet KILE <sup>2</sup>	0.946	0.890	0.723	0.417	0.223	0.000
<i>Sekvensiell seksjonering</i>	0.723	0.668	0.577	0.417	0.223	0.000

**Tabell 10.2:** Oppsummering av årlig antall innkoblinger mot varig feil i luftnett-modell

### 10.1.1 Rangering av seksjoneringsmetodikker i luftnett-modell

Basert på de årlige forventede avbruddskostnadene fra pålitelighetsberegningene er de ulike seksjoneringsmetodikkene rangert etter lønnsomhet, se tabell 10.3. Tabellen inneholder også en fargerangering som gir en indikasjon på størrelsen av forventningsverdien for antall innkoblinger mot varige feil. Fargerangeringen av metodikkene er relativ i forhold til hverandre, hvor fargen *rød* representerer størst forventningsverdi for antall innkoblinger mot feil, mens fargen *grønn* representerer lavest forventningsverdi.

Rangering	Seksjoneringsmetodikk	KILE [NOK/år]	Innkobling mot feil
1	Lengde av radial / Feilfrekvens	67698 ,-	●
2	Antall nettstasjoner 1 / Forventet KILE	70084 ,-	●
3	Antall nettstasjoner 2	71660 ,-	●
4	KILE-satser	75412 ,-	●
5	Sekvensiell seksjonering	82114 ,-	●

**Tabell 10.3:** Rangering av seksjoneringsmetodikker i luftnett-modell

<sup>1</sup>Likt seksjoneringsforløp som metodikken “halvering av lengde av radial”

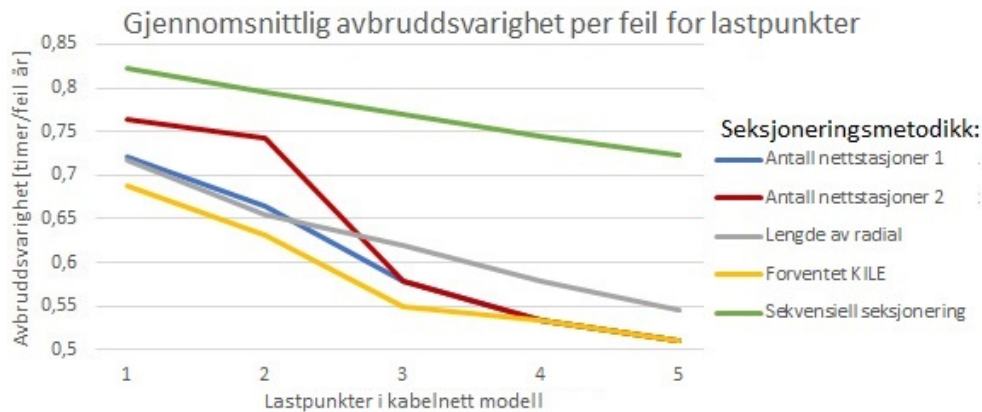
<sup>2</sup>Likt seksjoneringsforløp som metodikken “halvering av antall nettstasjoner 1”

## 10.2 Kabelnett-modell

Kabelnett kan seksjoneres både ved hjelp av prøvekoblinger og isolasjonsmålinger. Det er derfor gjort to separate analyser av hver seksjoneringsmetode. I likhet med luftnett-modellen benyttes sekundærkriteriene “*nærmeste nettstasjon*” og “*sannsynlighet for innkobling mot varig feil*”. Nettspesifikasjonene og oppbyggingen av kabelnett-modellen gjør at følgende seksjoneringsmetodikker gir likt seksjoneringsforløp:

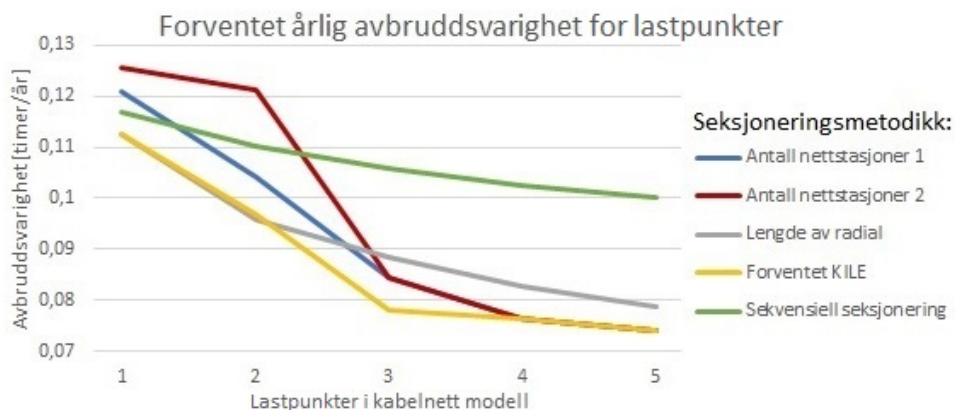
- halvering av antall nettstasjoner 1 - halvering av kile satser 1
- halvering av antall nettstasjoner 2 - halvering av kile satser 2
- halvering av lengde av radial - halvering av feilfrekvens

Figur 10.3 illustrerer den gjennomsnittlige avbruddsvarigheten per feil for de ulike lastpunktene når prøvekoblinger praktiseres. Figuren viser at avbruddsvarigheten i snitt er størst i det første lastpunktet og avtar gradvis utover radialen for alle seksjoneringsmetodikkene. *Sekvensiell seksjonering* er metodikken som gir størst avbruddsvarighet for alle lastpunkter, mens metodikken *halvering av forventet KILE* gir lavest.



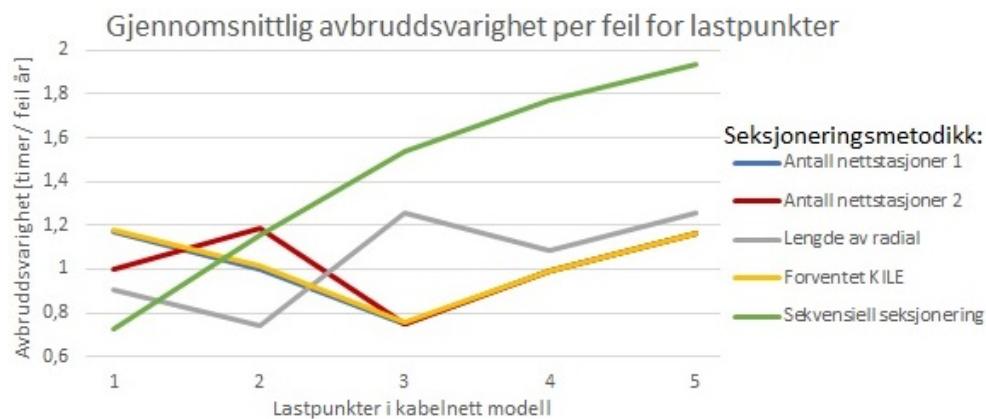
Figur 10.3: Gjennomsnittlig avbruddsvarighet per feil for prøvekoblinger i kabelnett-modell

De årlige forventede avbruddsvarighetene for hvert lastpunkt er illustrert i figur 10.4. Figuren viser at for de første to lastpunktene er det metodikken *halvering av antall nettstasjoner 2* som gir høyest årlig forventet avbruddsvarighet, mens metodikkene *halvering av lengde av radial* og *halvering av forventet KILE* gir lavest. Ellers har grafene relativt lik utforming som de gjennomsnittlige avbruddsvarighetene fra figur 10.3.



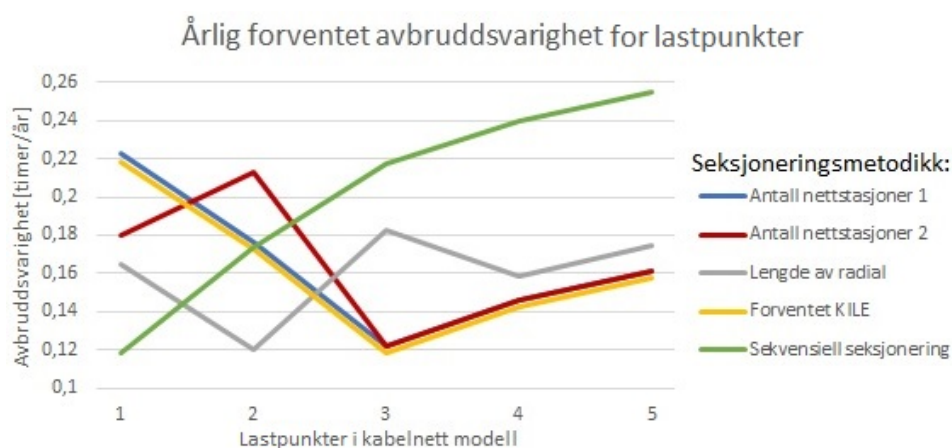
Figur 10.4: Årlig forventet avbruddsvarighet for prøvekoblinger kabelnett-modell

Figur 10.5 illustrerer de gjennomsnittlige avbruddsvarighetene per feil for lastpunktene når isolasjonsmålinger praktiseres. Sammenlignet med figur 10.3 gis det et mye bedre bilde på seksjoneringsforløpet for de ulike seksjoneringsmetodikkene. Årsaken til dette er at friskt nett oppstrøms feil fortløpende vil kunne gjenopprette kontinuerlig forsyningen, noe som ikke er tilfellet ved bruk av prøvekoblinger. Figuren viser at seksjoneringsmetodikken *sekvensiell seksjonering* gir lavest gjennomsnittlig avbruddsvarighet per feil i det første lastpunktet. Avbruddsvarigheten øker derimot langs radialen, og fra andre lastpunkt og ut er dette metodikken som gir høyest gjennomsnittlig avbruddsvarighet. Seksjoneringsmetodikken *halvering av lengde av radial* gir også lav avbruddsvarighet i de to første lastpunktene. Dette er naturlig da første seksjoneringspunkt ved bruk av denne metodikken er bryter  $LS_4$  i seksjon 2. Avbruddsvarighetene for de resterende seksjoneringsmetodikkene er V-form med bunnpunkt i seksjon 3. Dette fremkommer av at første seksjoneringspunkt for disse metodikkene er bryter  $LS_6$  i seksjon 3. En kan også se at de gjennomsnittlige avbruddsvarighetene for alle lastpunkter er mye større enn ved bruk av prøvekoblinger. Dette skyldes at isolasjonsmålinger er en mye mer tidkrevende seksjoneringsmetode enn prøvekoblinger.



**Figur 10.5:** Gjennomsnittlig avbruddsvarighet per feil for isolasjonsmålinger i kabelnett-modell

De årlige forventede avbruddsvarighetene for de ulike seksjoneringsmetodikkene er illustrert i figur 10.6. Figuren illustrerer forventningsverdier for årlige avbruddsvarigheter, og i motsetning til beregningene av gjennomsnittlige avbruddsvarigheter per feil er feilsannsynlighetene på kabelstrekningene inkludert. Seksjoneringsmetodikkene *sekvensiell seksjonering* og *halvering av lengde av radial* gir i likhet med figur 10.5 lavest avbruddsvarigheter i de to første seksjonene og størst i de tre siste. Grafene av de resterende seksjoneringsmetodikkene har relativt lik utforming som de gjennomsnittlige avbruddsvarighetene fra figur 10.5.



**Figur 10.6:** Årlig forventet avbruddsvarighet for isolasjonsmålinger i kabelnett-modell

En oppsummering av resultatene fra pålitelighetsanalysene av kabelnett-modellen er vist i tabell 10.4 og tabell 10.5. Det fremkommer av tabell 10.4 at prøvekoblinger er seksjoneringsmetoden som gir best pålitelighetsindekser uavhengig av seksjoneringsmetodikk. For prøvekoblinger er det metodikken *halvering av forventet KILE* som gir best pålitelighetsindekser. Årlig forventet ILE og SAIDI er hele 4,4% lavere enn for metodikken *halvering av lengde av radial* som gir nest best pålitelighetsindekser. Merkværdig er det at sistnevnte metodikk har lavere forventet ILE og SAIDI enn metodikken *halvering av nettstasjon 1*, men forventet årlig avbruddskostnad er derimot høyere. I likhet med pålitelighetsanalysen av luftnett-modellen er det metodikken *sekvensiell seksjonering* som gir dårligst pålitelighet. Årlig forventet ILE er hele 22.3% større enn metodikken *halvering av forventet KILE*, og forventet årlig avbruddskostnader er 18.1% større.

Seksjoneringsetodikk	SAIDI [min/år]	ASAI [-]	ILE [kWh/år]	KILE [NOK/år]
<b>Prøvekobling</b>				
<i>Halveringsprinsippet:</i>				
Antall nettstasjoner 1	5.52	0.9999895	230.0	23810 ,-
Antall nettstasjoner 2	5.78	0.9999890	240.9	24491 ,-
lengde av radial	5.50	0.9999895	229,1	24036 ,-
Feilfrekvens <sup>1</sup>	5.50	0.9999895	229,1	24036 ,-
KILE-satser 1 <sup>2</sup>	5.52	0.9999895	230.0	23810 ,-
KILE-satser 2 <sup>3</sup>	5.78	0.9999890	240.9	24491 ,-
Forventet KILE	5.26	0.9999900	219.0	23118 ,-
<i>Sekvensiell seksjonering</i>	6.43	0.9999878	267.8	27295 ,-
<b>Isolasjonsmåling</b>				
<i>Halveringsprinsippet:</i>				
Antall nettstasjoner 1	9.95	0.9999811	414.7	36038 ,-
Antall nettstasjoner 2	9.87	0.9999812	411.3	36073 ,-
lengde av radial	9.61	0.9999817	400.4	36249 ,-
Feilfrekvens <sup>1</sup>	9.61	0.9999817	400.4	36249 ,-
KILE-satser 1 <sup>2</sup>	9.95	0.9999811	414.7	36038 ,-
KILE-satser 2 <sup>3</sup>	9.87	0.9999812	411.3	36073 ,-
Forventet KILE	9.70	0.9999815	404.2	35243 ,-
<i>Sekvensiell seksjonering</i>	12.0	0.9999771	502.0	42165 ,-

**Tabell 10.4:** Oppsummering av pålitelighetsindekser i kabelnett-modell

For isolasjonsmålinger gir metodikken *halvering av lengde av radial* best pålitelighetsindekser. Det er likevel seksjoneringsmetodikken *halvering av forventet KILE* som gir lavest årlige forventede avbruddskostnader. Pålitelighetsindeksene SAIDI og ILE er henholdsvis 0.93% og 0.94% lavere, men avbruddskostnadene er likevel 2.9% større. Seksjoneringsmetodikken *sekvensiell seksjonering* gir dårligst pålitelighet. Årlig forventet ILE er hele 24.2% større enn for metodikken *halvering av forventet KILE*, og de årlige forventede avbruddskostnadene er 19.6% større. Det fremkommer av tabell 10.4 at gode pålitelighetsindekser i kabelnett ikke nødvendigvis gir de laveste årlige forventede avbruddskostnadene.

<sup>1</sup>Likt seksjoneringsforløp som metodikken "halvering av lengde av radial"

<sup>2</sup>Likt seksjoneringsforløp som metodikken "halvering av antall nettstasjoner 1"

<sup>3</sup>Likt seksjoneringsforløp som metodikken "halvering av antall nettstasjoner 2"

Tabell 10.5 viser årlig antall forventet innkoblinger mot varig feil når prøvekoblinger benyttes som seksjoneringsmetode i kabelnett-modellen. I likhet med luftnett-modellen vil seksjoner nærmest transformatorstasjonen bli utsatt for flest innkoblinger mot varig feil da de inngår i flere prøvekoblinger. Fra tabellen ser en at seksjoneringsmetodikken *sekvensiell seksjonering* gir desidert lavest forventningsverdier for alle seksjoner. Forventningsverdiene i seksjon 1, 2 og 3 er henholdsvis 34.1 % , 44.1 % og 29.4 % lavere enn *halvering av lengde av radial* som gir nest lavest forventningsverdier. Verst ut kommer seksjoneringsmetodikken *halvering av antall nettstasjoner 1* og *halvering av forventet KILE*. Forventningsverdien i seksjon 6 er lik null for alle seksjoneringsmetodikker. Dette kommer av at siste mulige seksjoneringspunkt er lokalisert i seksjon 5, noe som medfører at seksjon 6 ikke blir utsatt for innkoblinger mot varig feil med mindre reservemating legges inn mot feil.

Seksjoneringsmetodikk	Forventet årlig antall innkobling mot feil					
	Sek. 1	Sek. 2	Sek. 3	Sek. 4	Sek. 5	Sek. 6
<i>Halveringsprinsippet:</i>						
Antall nettstasjoner 1	0.280	0.230	0.145	0.035	0.015	0.000
Antall nettstasjoner 2	0.230	0.180	0.145	0.035	0.015	0.000
lengde av radial	0.220	0.170	0.085	0.060	0.015	0.000
Feilfrekvens <sup>1</sup>	0.220	0.170	0.085	0.060	0.015	0.000
KILE-satser 1 <sup>2</sup>	0.280	0.230	0.145	0.035	0.015	0.000
KILE-satser 2 <sup>3</sup>	0.230	0.180	0.145	0.035	0.015	0.000
Forventet KILE	0.280	0.230	0.145	0.035	0.015	0.000
<i>Sekvensiell seksjonering</i>	0.145	0.095	0.060	0.035	0.015	0.000

Tabell 10.5: Oppsummering av årlig antall innkoblinger mot varig feil i kabelnett-modell

### 10.2.1 Rangering av seksjoneringsmetodikker i kabelnett-modell

I likhet med luftnett-modellen er seksjoneringsmetodikkene rangert etter forventede avbruddskostnader, se tabell 10.6. Fargerangeringen baserer seg på tabell 10.5, og gir en indikasjon på forventningsverdier for innkoblinger mot feil når kabelnettet seksjoneres ved hjelp av prøvekoblinger. Fargen *rød* representerer størst forventningsverdi for antall innkoblinger mot feil, mens fargen *grønn* representerer lavest forventningsverdi.

Rangering	Seksjoneringsmetodikk	KILE [NOK/år]	Innkobling mot feil
<b><i>Prøvekoblinger:</i></b>			
1	Forventet KILE	23118 ,-	
2	Antall nettstasjoner 1 / KILE-satser 1	23810 ,-	
3	lengde av radial / Feilfrekvens	24036 ,-	
4	Antall nettstasjoner 2 / KILE-satser 2	24491 ,-	
5	Sekvensiell seksjonering	27295 ,-	
<b><i>Isolasjonsmålinger:</i></b>			
1	Forventet KILE	35243 ,-	
2	Antall nettstasjoner 1 / KILE-satser 1	36038 ,-	
3	Antall nettstasjoner 2 / KILE-satser 2	36073 ,-	
4	lengde av radial / Feilfrekvens	36249 ,-	
5	Sekvensiell seksjonering	42165 ,-	

Tabell 10.6: Rangering av seksjoneringsmetodikker i kabelnett-modell

<sup>1</sup>Likt seksjoneringsforløp som metodikken “halvering av lengde av radial”

<sup>2</sup>Likt seksjoneringsforløp som metodikken “halvering av antall nettstasjoner 1”

<sup>3</sup>Likt seksjoneringsforløp som metodikken “halvering av antall nettstasjoner 2”

# 11 | Følsomhetsanalyse

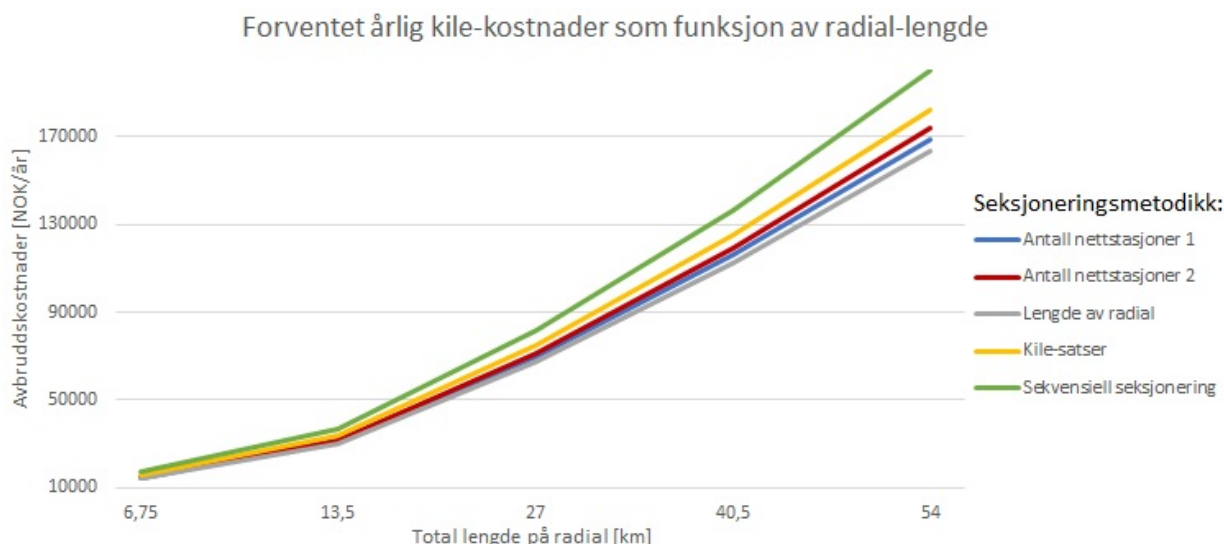
For å se hvordan resultatene av pålitelighetsanalysene påvirkes av endringer i ulike parametere er det utført forskjellige følsomhetsanalyser. I følsomhetsanalysene blir parameterne presentert i delkapittel 8.1.1 og delkapittel 8.2.1 forandret.

I likhet med de originale resultatene er det benyttet en forenklet og plassbesparende framstilling av sekundærkriteriene *nærmeste nettstasjon* og *sannsynlighet for innkobling mot varig feil* ved å referere til tallverdier. Følgende tallverdier representerer sekundærkriteriene:

- 1 Sekundærkriteriet *nærmeste nettstasjon*
- 2 Sekundærkriteriet *sannsynlighet for innkobling mot varig feil*

## 11.1 Skalering av lengder

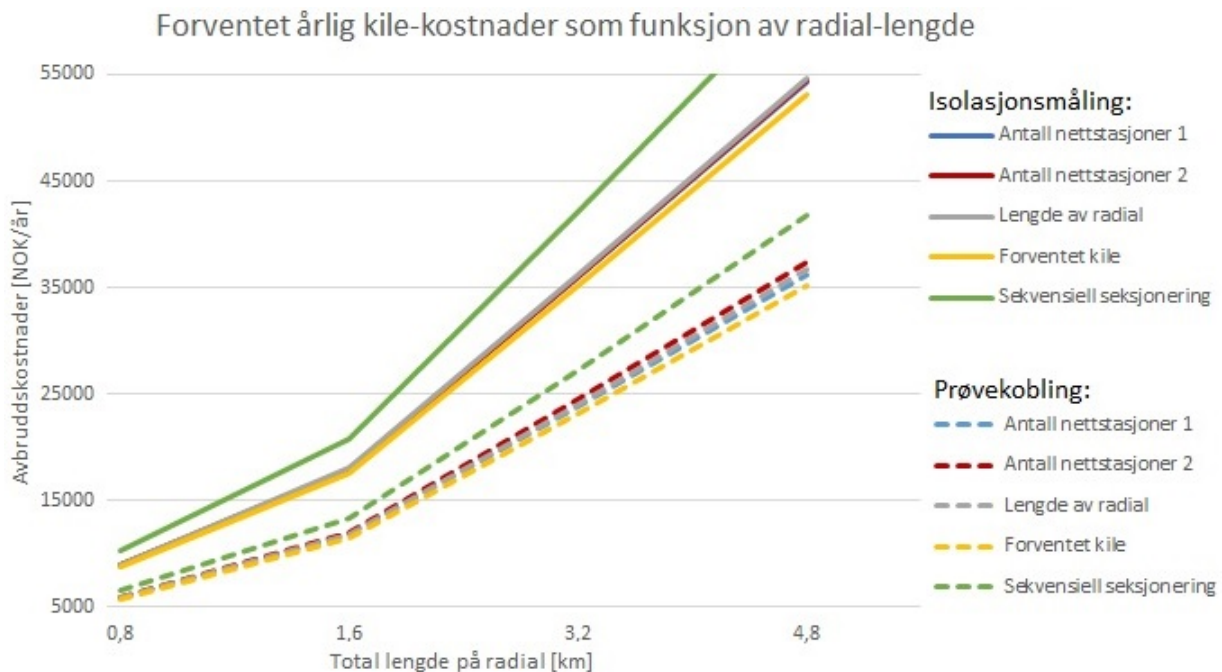
Lengdene av kraftlinjene og kraftkablene er skalert for å se hvordan de årlige forventede avbruddskostnadene endres. Figur 11.1 viser de årlige forventede avbruddskostnadene som funksjon av total lengde på luftnett-modellen. Den totale lengden av luftnett-modellen er i de originale resultatene 27 km lang.



Figur 11.1: Skalering av lengde av kraftlinjer i luftnett-modell

Figuren viser at seksjoneringsmetodikken *sekvensiell seksjonering* gir størst årlige forventede avbruddskostnader for alle lengder, mens metodikken *halvering av lengde av radial* lavest. Når den totale lengden av radialen halveres oppstår det knekkpunkter hvor stigningstallet på kurvene øker. Knekkpunktene oppstår som et resultat av de ikke-kontinuerlige kostnadsfunksjonene fra tabell 2.1. Etterhvert som lengden på radialen øker blir det større synlige forskjeller i de årlige forventede avbruddskostnadene for de ulike seksjoneringsmetodikkene.

Figur 11.2 illustrerer de årlige forventede avbruddskostnadene som funksjon av den totale lengden på kabelnett-modellen både for seksjonering ved hjelp av prøvekoblinger og isolasjonsmålinger. De heltrukne linjene representerer seksjonering ved hjelp av isolasjonsmålinger, mens de stiplede linjene representerer seksjonering ved hjelp av prøvekoblinger. Den totale lengden av kabelnett-modellen er i de originale resultatene 3.2 km lang.



**Figur 11.2:** Skalering av lengde av kabelstrekninger i kabelnett-modell

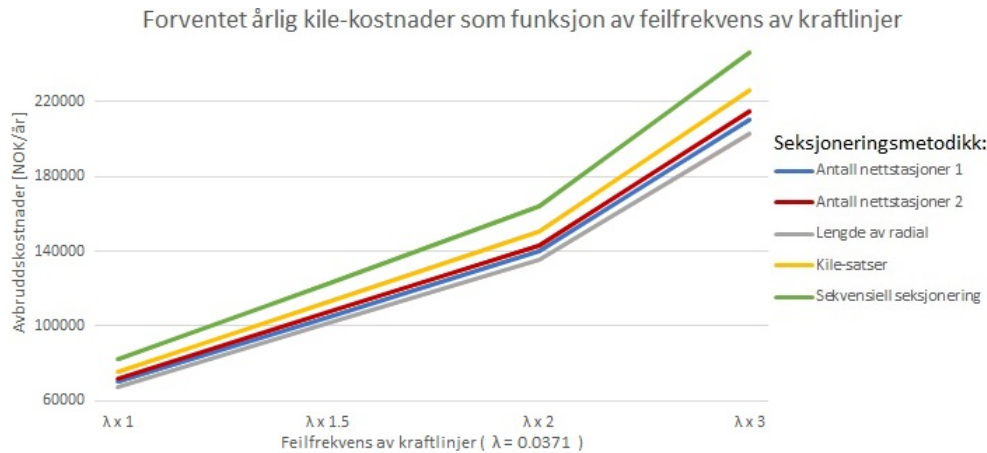
Figuren viser at seksjoneringsmetodikken *sekvensiell seksjonering* gir klart høyest årlig forventede avbruddskostnader for alle lengder både ved bruk av prøvekoblinger og isolasjonsmålinger, mens metodikken *halvering av forventet KILE* gir lavest. I likhet med luftnett-modellen oppstår det knekkpunkter når den totale lengden av radialen halveres som følge av de ikke-kontinuerlige kostnadsfunksjonene fra tabell 2.1. Etter knekkpunktene blir forskjellene i de årlige forventede avbruddskostnadene mer synlig, spesielt for prøvekoblinger.

## 11.2 Skalering av feilfrekvenser

I pålitelighetsanalysene er feilfrekvensen av kraftlinjer og kabelstrekninger konstante verdier. Feilfrekvensen av alle kraftlinjer er satt lik 0.0371 feil/km år mens for kabelstrekninger 0.05 feil/ km år. I og med at feilfrekvensene har relativt pessimistiske verdier er det valgt å skalere feilfrekvensene for å se hvordan resultatene av pålitelighetsanalysene påvirkes, se figur 11.3 og figur 11.4.

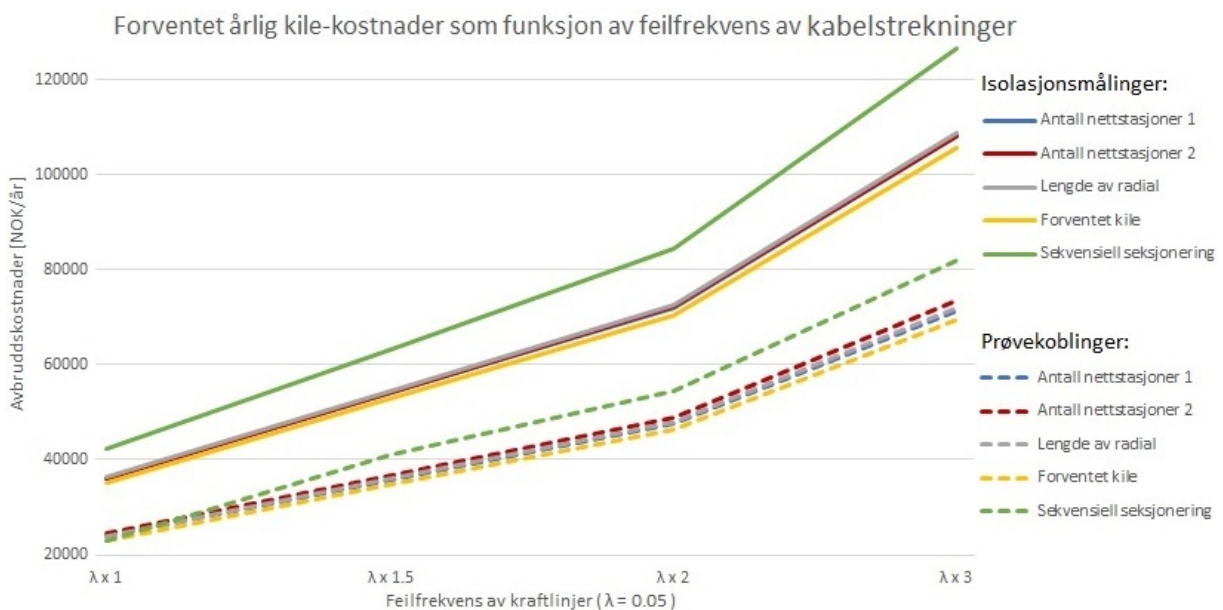


Figur 11.3 illustrerer hvordan de årlige forventede avbruddskostnadene påvirkes av endringer i feilfrekvens for luftnett-modellen. Etterhvert som feilfrekvensen ( $\lambda$ ) øker vil også forskjellene i årlige forventede avbruddskostnader bli mer synlige. Seksjoneringsmetodikken *sekvensiell seksjonering* gir høyest avbruddskostnader for alle feilfrekvenser, mens metodikken *halvering av lengde av radial* lavest. Figuren viser at det oppstår knekkpunkter når feilfrekvensene dobles, noe som skyldes de ikke-kontinuerlige kostnadsfunksjonene. Etter knekkpunktene øker stigningstallet av grafene, noe som gir større synlige forskjeller i årlige forventede avbruddskostnader.



**Figur 11.3:** Skalering av feilfrekvens av kraftlinjer i luftnett-modell

De årlige forventede avbruddskostnadene som funksjon av feilfrekvens i kabelnett-modellen er illustrert i figur 11.4. De heltrukne linjene representerer seksjonering ved hjelp av isolasjonsmålinger, mens de stiplede linjene representerer seksjonering ved bruk av prøvekoblinger. Figuren viser at isolasjonsmålinger medfører størst årlige avbruddskostnader. For begge seksjoneringsmetodene gir *sekvensiell seksjonering* størst avbruddskostnader for alle feilfrekvenser, mens *halvering av forventet KILE* lavest. I likhet med luftnett-modellen skyldes knekkpunktene ved doblede feilfrekvenser de ikke-kontinuerlige kostnadsfunksjonene. Etterhvert som feilfrekvensen øker blir det større synlige forskjeller i de årlige forventede avbruddskostnadene for de ulike seksjoneringsmetodikkene.



**Figur 11.4:** Skalering av feilfrekvens av kabelstrekninger i kabelnett-modell

### 11.3 Endring i kundesammensetning

Den originale kundesammensetningen i luftnett- og kabelnett-modellen er illustrert i tabell 8.1 og tabell 8.3. I luftnett-modellen er kundene med de største spesifikke avbruddskostnadene lokalisert i seksjon 1. Gradvis langs radialen minker de spesifikke avbruddskostnadene da andelen av husholdninger øker og andelen industri, handel og tjeneste minker. Kabelnett-modellen er utformet slik at den største andelen av kritiske kunder er lokalisert ytterst på radialen, og desto nærmere transformatorstasjonen en kommer desto mer minker de spesifikke avbruddskostnadene. For å se hvordan resultatene av pålitelighetsberegningene påvirkes av de spesifikke avbruddskostnadene er kundesammensetningen i de to nettmodellene forandret. Tabell 11.1 og tabell 11.2 viser den nye kundesammensetningen i de ulike seksjonene for henholdsvis luftnett- og kabelnett-modellen. Pålitelighetsanalysene i følgende delkapittel er utført på samme måte som presentert i kapittel 9.

Kundegrupper	Prosentvis kundesammensetning i seksjoner [%]					
	Seksjon 1	Seksjon 2	Seksjon 3	Seksjon 4	Seksjon 5	Seksjon 6
Husholdning	100	50	50	40	40	40
Handel	0	0	0	0	10	20
Jordbruk	0	50	30	20	10	0
Industri	0	0	20	40	40	40
Offentlig virksomhet	0	0	0	0	0	0
Kraftintensiv industri	0	0	0	0	0	0

Tabell 11.1: Kundesammensetning i de ulike seksjonene i luftnett-modell

Kundegrupper	Prosentvis kundesammensetning i lastpunkter [%]				
	Lastpkt. 1	Lastpkt. 2	Lastpkt. 3	Lastpkt. 4	Lastpkt. 5
Husholdning	10	20	40	50	60
Handel	70	60	50	40	20
Jordbruk	0	0	0	0	0
Industri	0	0	0	0	10
Offentlig virksomhet	20	20	10	10	10
Kraftintensiv industri	0	0	0	0	0

Tabell 11.2: Kundesammensetning i lastpunktene i kabelnett-modell

Basert på den nye kundesammensetningen er de gjennomsnittlige KILE-satsene for luftnett- og kabelnett-modellen beregnet med samme framgangsmetode som beskrevet i delkapittel 8.1.1, se tabell 11.3 og tabell 11.4.

Seksjoner	Gjennomsnittlig KILE-satser i seksjoner [NOK]					
	Seksjon 1	Seksjon 2	Seksjon 3	Seksjon 4	Seksjon 5	Seksjon 6
Kile-satser	2109.1	2884.3	3968.4	5207.6	6736.9	8266.2

Tabell 11.3: Gjennomsnittlig KILE-satser i luftnett-modell

Lastpunkter	Gjennomsnittlig KILE-satser for lastpunkter [NOK]				
	Lastpunkt 1	Lastpunkt 2	Lastpunkt 3	Lastpunkt 4	Lastpunkt 5
Kile-satser	40283.2	36072.4	29094.2	24883.4	18204.5

Tabell 11.4: Gjennomsnittlig KILE-satser i kabelnett-modell

### 11.3.1 Resultater for luftnett-modell

Av alle seksjoneringsmetodikkene er det kun *halvering av KILE-satser* og *halvering av forventet KILE* som er avhengig av KILE-satser og derav kundesammensetningen. Seksjoneringsforløpet til de andre seksjoneringsmetodikkene forblir uforandret. Endringene av kundesammensetning i luftnett-modellen fører til at følgende seksjoneringsmetodikker gir samme seksjoneringsforløp:

- halvering av KILE-satser
- halvering av forventet KILE
- halvering av lengde av radial
- halvering av feilfrekvens

Siden endringene i kundesammensetning ikke gir nye seksjoneringsforløp er gjennomsnittlig avbruddsvarighet per feil og forventet årlig avbruddsvarighet ikke illustrert. Kurvene vil være lik som i figur 10.1 og figur 10.2, bortsett fra at metodikkene *halvering av KILE-satser* og *halvering av forventet KILE* vil ha samme forløp som *halvering av lengde av radial*.

Tabell 11.5 viser at de fire metodikkene med likt seksjoneringsforløp gir best pålitelighetsindekser. Årlig forventet avbruddskostnad er hele 5.5% lavere enn for metodikken *halvering av antall nettstasjoner 1* som gir nest best pålitelighetsindekser, mens forventet ILE og SAIDI er begge 4.9 % lavere. *Sekvensiell seksjonering* er metodikken som gir dårligst pålitelighetsindekser da årlig forventet ILE og avbruddskostnader er henholdsvis 27.7% og 24.1% større enn de fire nevnte metodikkene. Selv om de fire metodikkene gir gode pålitelighetsindekser resulterer dette i høye forventningsverdier for årlig antall innkoblinger mot varige feil, se tabell 11.6. I seksjon 1, 2, 3 og 4 er forventningsverdiene henholdsvis 73.2%, 79.0%, 78.5% og 42.3% større enn for *sekvensiell seksjonering* som gir klart lavest forventningsverdier.

Seksjoneringsmetodikk	SAIDI [min/år]	ASAI [-]	ILE [kWh/år]	KILE [NOK/år]
<i>Halveringsprinsippet:</i>				
Antall nettstasjoner 1	81.8617	0.999844	1637.2	74986 ,-
Antall nettstasjoner 2	83.5071	0.999841	1670.1	75793 ,-
lengde av radial	77.8540	0.999852	1557.1	71071 ,-
KILE-satser	77.8540	0.999852	1557.1	71071 ,-
Feilfrekvens	77.8540	0.999852	1557.1	71071 ,-
Forventet KILE	77.8540	0.999852	1557.1	71071 ,-
<i>Sekvensiell seksjonering</i>	99.4536	0.999811	1989.1	88233 ,-

Tabell 11.5: Oppsummering av pålitelighetsindekser i luftnett-modell

Seksjoneringsmetodikk	Forventet årlig antall innkobling mot varig feil					
	Sek. 1	Sek. 2	Sek. 3	Sek. 4	Sek. 5	Sek. 6
<i>Halveringsprinsippet:</i>						
Antall nettstasjoner 1	0.946	0.890	0.723	0.417	0.223	0.000
Antall nettstasjoner 2	0.890	0.835	0.723	0.417	0.223	0.000
lengde av radial	1.252	1.196	1.030	0.723	0.223	0.000
KILE-satser	1.252	1.196	1.030	0.723	0.223	0.000
Feilfrekvens	1.252	1.196	1.030	0.723	0.223	0.000
Forventet KILE	1.252	1.196	1.030	0.723	0.223	0.000
<i>Sekvensiell seksjonering</i>	0.723	0.668	0.577	0.417	0.223	0.000

Tabell 11.6: Oppsummering av årlig antall innkoblinger mot varig feil i luftnett-modell

---

### 11.3.2 Rangering av seksjoneringsmetodikker i luftnett-modell

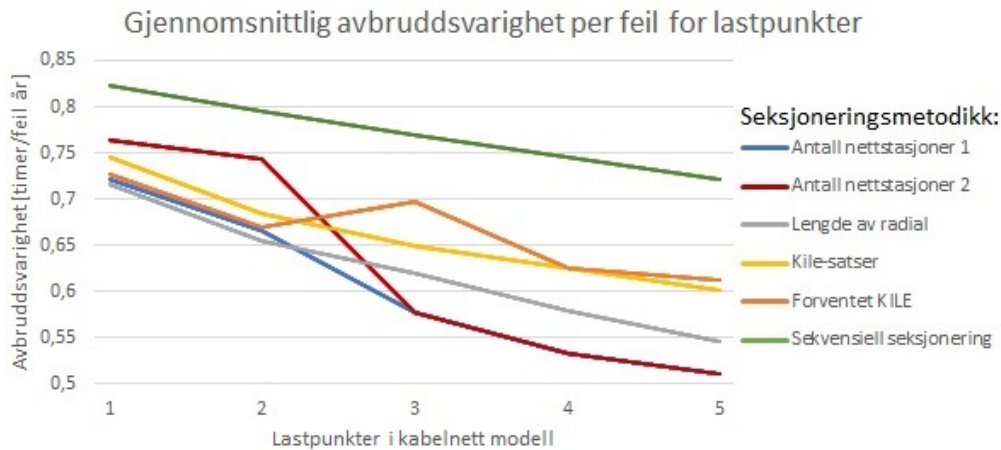
Basert på de årlige forventede avbruddskostnadene fra tabell 11.5 er de ulike seksjoneringsmetodikkene rangert etter lønnsomhet, se tabell 11.7. Tabellen inneholder også en fargerangering basert på tabell 11.6 som gir en indikasjon på størrelsen av forventningsverdien for antall innkoblinger mot varige feil. Fargerangeringen av de ulike metodikkene er relativ i forhold til hverandre, hvor fargen *rød* representerer størst forventningsverdi for antall innkoblinger mot feil, mens fargen *grønn* representerer lavest forventningsverdi.

Rangering	Seksjoneringsmetodikk	KILE [NOK/år]	Innkobling mot feil
1	Lengde av radial / Feilfrekvens / Forventet KILE / KILE-satser	71071 ,-	
2	Antall nettstasjoner 1	74986 ,-	
3	Antall nettstasjoner 2	75793 ,-	
4	Sekvensiell seksjonering	88233 ,-	

**Tabell 11.7:** Rangering av seksjoneringsmetodikker i luftnett-modell

### 11.3.3 Resultater for kabelnett-modell

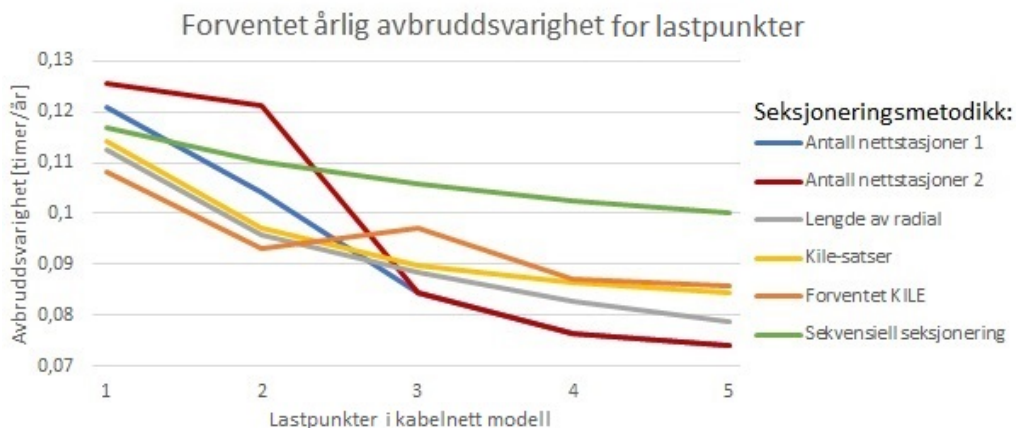
I kabelnett-modellen er det også bare seksjoneringsmetodikkene *halvering av KILE-satser* og *halvering av forventet KILE* som blir påvirket av endringer i kundesammensetning. Når kabelnettet seksjoneres ved hjelp av prøvekoblinger vil endringen i kundesammensetning gi to nye seksjoneringsforløp, se figur 11.5.



Figur 11.5: Gjennomsnittlig avbruddsvarighet per feil for prøvekoblinger i kabelnett-modell

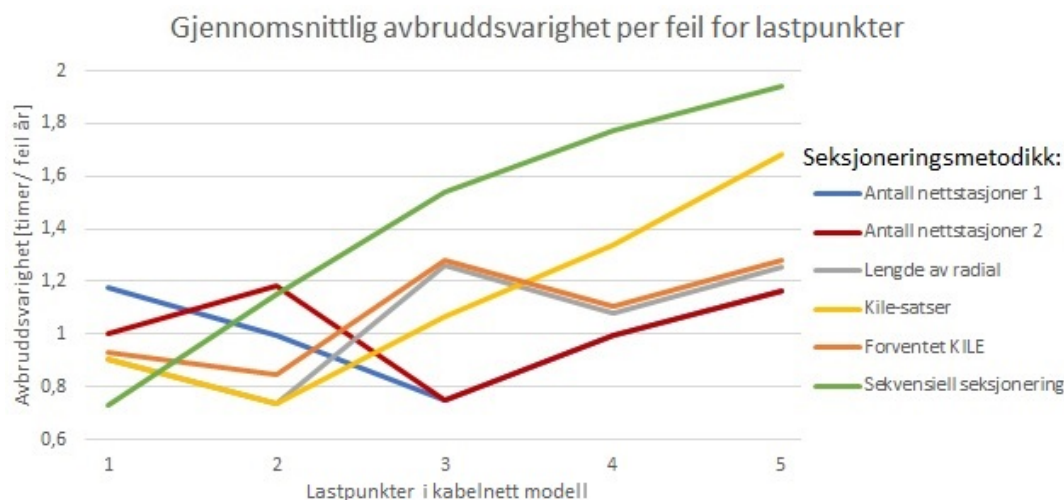
Figuren illustrerer at de gjennomsnittlige avbruddsvarighetene gradvis minker langs radialen. Dette skyldes at reservematingen benyttes fortløpende til å gjenopprette kontinuerlig forsyningen i friskt nett nedstrøms feil. Friskt nett oppstrøms feil vil bli utsatt for gjentatte inn- og utkoblinger og vil ikke gjenopprette kontinuerlig forsyning før feil er isolert mellom to nærliggende brytere. Figuren viser at *sekvensiell seksjonering* gir klart høyest gjennomsnittlig avbruddsvarighet per feil for alle lastpunkter. Seksjoneringsmetodikkene *halvering av lengde av radial*, *halvering av antall nettstasjoner 1* og *halvering av forventet KILE* gir lavest gjennomsnittlig avbruddsvarighet for de to første seksjonene, mens metodikken *halvering av antall nettstasjoner 2* gir lavest for de tre siste seksjonene.

De årlig forventede avbruddsvarighetene for seksjonering ved hjelp av prøvekoblinger er illustrert i figur 11.6. Figuren viser at metodikken *halvering av antall nettstasjoner 2* gir høyest årlig forventet avbruddsvarighet i de to første seksjonene, mens metodikken *halvering av forventet KILE* gir lavest. I de tre siste seksjonene er avbruddsvarigheten høyest for *sekvensiell seksjonering*, og lavest for metodikkene *halvering av antall nettstasjoner 1* og *2*.



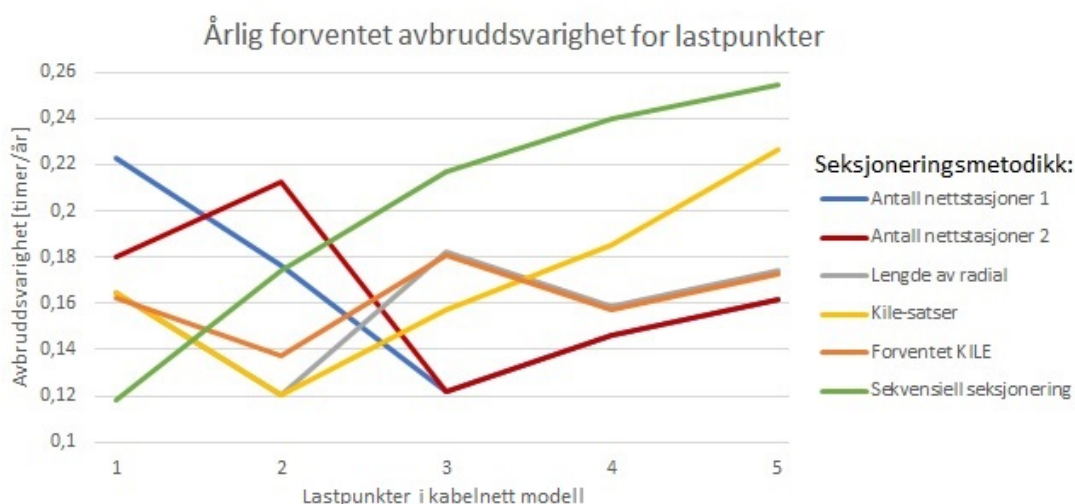
Figur 11.6: Årlig forventet avbruddsvarighet for prøvekoblinger i kabelnett-modell

I likhet med seksjonering ved hjelp av prøvekoblinger vil metodikkene *halvering av KILE-satser* og *halvering av forventet KILE* gi to nye seksjoneringsforløp ved bruk av isolasjonsmålinger, se figur 11.7. Figuren gir et godt bilde av seksjoneringsforløpet for de ulike metodikkene. Bunnpunktene representerer første seksjoneringspunkt, mens nest lavest avbruddsvarighet representerer lokasjon til neste seksjoneringspunkt. For eksempel, ved bruk av metodikken *halvering av lengde av radial* vil bryter i nettstasjon 2 seksjoneres først etterfulgt av bryter i nettstasjon 4 dersom feil er lokalisert nedstrøms seksjon 2. Figur 11.7 viser at *sekvensiell seksjonering* gir lavest gjennomsnittlig avbruddsvarighet for første seksjon, men høyest fra og med tredje seksjon og ut. Seksjoneringsmetodikkene *halvering av antall nettstasjoner 1 og 2* gir høyest gjennomsnittlig avbruddsvarighet i første seksjon, men lavest fra tredje seksjon og ut.



**Figur 11.7:** Gjennomsnittlig avbruddsvarighet per feil for isolasjonsmålinger i kabelnett-modell

Figur 11.8 illustrerer de årlige forventede avbruddsvarighetene for de ulike lastpunktene. Sammenlignet med figur 11.7 er kurvene for de ulike seksjoneringsmetodikkene relativt like. Den største forskjellen er at forventningsverdiene for metodikkene *halvering av antall nettstasjoner 1 og 2* har økt i forhold til de andre metodikkene i de to første seksjonene.



**Figur 11.8:** Årlig forventet avbruddsvarighet for isolasjonsmålinger i kabelnett-modell

Av alle seksjoneringsmetodikkene er det kun metodikkene *halvering av lengde av radial* og *halvering av feilfrekvens* som gir likt seksjoneringsforløp. En oppsummering av resultatene fra pålitelighetsanalysene er illustrert i tabell 11.8. Tabellen viser at prøvekoblinger er seksjoneringsmetoden som gir best pålitelighetsindekser uavhengig av seksjoneringsmetodikk. For seksjonering av kabelnett-modell ved hjelp av prøvekoblinger er det metodikken *halvering av lengde av radial* som gir best pålitelighetsindekser og lavest avbruddskostnader. Årlig forventet SAIDI og ILE er henholdsvis 0.36% og 0.39% lavere enn metodikken *halvering av antall nettstasjoner 1* som gir nest best pålitelighetsindekser. Det er likevel metodikken *halvering av forventet KILE* som gir nest lavest årlige forventede avbruddskostnader. Basert på figur 11.5 og figur 11.6 er det ikke uventet at *sekvensiell seksjonering* gir dårligst pålitelighetsindekser. Årlig forventet ILE er 16.9% større enn metodikken *halvering av lengde av radial*, og årlige forventede avbruddskostnader er 10.5% større.

For seksjonering ved hjelp av isolasjonsmålinger er det også metodikken *halvering av lengde av radial* som gir best pålitelighetsindekser og lavest avbruddskostnader. Årlig forventet ILE og SAIDI er begge 0.9% lavere enn for metodikken *halvering av forventet KILE* som gir nest best pålitelighetsindekser, mens årlige forventede avbruddskostnader er 2.71% lavere. *Sekvensiell seksjonering* gir i likhet med de andre analysene dårligst pålitelighetsindekser. Årlig forventet ILE er hele 25.4% høyere enn metodikken *halvering av lengde av radial*, mens årlige forventede avbruddskostnader er 11.0% større.

<b>Seksjoneringsetodikk</b>	SAIDI [min/år]	ASAI [-]	ILE [kWh/år]	KILE [NOK/år]
<b>Prøvekobling</b>				
<i>Halveringsprinsippet:</i>				
Antall nettstasjoner 1	5.52	0.9999895	230.0	25593 ,-
Antall nettstasjoner 2	5.78	0.9999890	240.9	26653 ,-
lengde av radial	5.50	0.9999895	229,1	25221 ,-
Feilfrekvens	5.50	0.9999895	229,1	25221 ,-
KILE-satser	5.67	0.9999892	236.1	25690 ,-
Forventet KILE	5.66	0.9999892	235.6	25513 ,-
<i>Sekvensiell seksjonering</i>	6.43	0.9999878	267.8	27875 ,-
<b>Isolasjonsmåling</b>				
<i>Halveringsprinsippet:</i>				
Antall nettstasjoner 1	9.95	0.9999811	414.7	37201 ,-
Antall nettstasjoner 2	9.87	0.9999812	411.3	36918 ,-
lengde av radial	9.61	0.9999817	400.4	35676 ,-
Feilfrekvens	9.61	0.9999817	400.4	35676 ,-
KILE-satser	10.03	0.9999809	418.0	37324 ,-
Forventet KILE	9.70	0.9999815	404.2	36670 ,-
<i>Sekvensiell seksjonering</i>	12.0	0.9999771	502.0	39598 ,-

**Tabell 11.8:** Oppsummering av pålitelighetsindekser i kabelnett-modell

Tabell 11.9 viser årlig forventet antall innkoblinger mot varig feil når prøvekoblinger benyttes som seksjoneringsmetode i kabelnett-modellen. Tabellen viser at *sekvensiell seksjonering* gir lavest forventningsverdier. Forventningsverdiene for seksjon 1, 2 og 3 er henholdsvis 34.1 % , 44.1 % og 29.4 % lavere enn for *halvering av lengde av radial* som gir lavest forventede avbruddskostnader. Metodikken *halvering av forventet KILE* gir nest lavest forventningsverdi for antall innkoblinger mot varig feil, mens metodikken *halvering av antall nettstasjoner 1* gir klart høyest.

Seksjoneringsmetodikk	Forventet årlig antall innkobling mot feil					
	Sek. 1	Sek. 2	Sek. 3	Sek. 4	Sek. 5	Sek. 6
<i>Halveringsprinsippet:</i>						
Antall nettstasjoner 1	0.280	0.230	0.145	0.035	0.015	0.000
Antall nettstasjoner 2	0.230	0.180	0.145	0.035	0.015	0.000
lengde av radial	0.220	0.170	0.085	0.060	0.015	0.000
Feilfrekvens	0.220	0.170	0.085	0.060	0.015	0.000
KILE-satser	0.195	0.145	0.060	0.035	0.015	0.000
Forventet KILE	0.195	0.145	0.060	0.035	0.015	0.000
<i>Sekvensiell seksjonering</i>	0.145	0.095	0.060	0.035	0.015	0.000

Tabell 11.9: Oppsummering av årlig antall innkoblinger mot varig feil i kabelnett-modell

#### 11.3.4 Rangering av seksjoneringsmetodikker i kabelnett-modell

Basert på de årlige forventede avbruddskostnadene fra pålitelighetsberegningene er de ulike seksjoneringsmetodikkene rangert etter lønnsomhet, se tabell 11.10. Tabellen inneholder også en fargerangering basert på tabell 11.9 som gir en indikasjon på størrelsen av forventningsverdien for antall innkoblinger mot varige feil. Fargerangeringen av seksjoneringsmetodikkene er relativ i forhold til hverandre, hvor fargen *rød* representerer størst forventningsverdi for antall innkoblinger mot feil, mens fargen *grønn* representerer lavest forventningsverdi.

Rangering	Seksjoneringsmetodikk	KILE [NOK/år]	Innkobling mot feil
<b><i>Prøvekoblinger:</i></b>			
1	Lengde av radial / Feilfrekvens	25221 ,-	●
2	Forventet KILE	25513 ,-	●
3	Antall nettstasjoner 1	25593 ,-	●
4	KILE-satser	25690 ,-	●
5	Antall nettstasjoner 2	26653 ,-	●
6	Sekvensiell seksjonering	27875 ,-	●
<b><i>Isolasjonsmålinger:</i></b>			
1	Lengde av radial / Feilfrekvens	35676 ,-	
2	Forventet KILE	36670 ,-	
3	Antall nettstasjoner 2	36918 ,-	
4	Antall nettstasjoner 1	37201 ,-	
5	KILE-satser	37324 ,-	
6	Sekvensiell seksjonering	39598 ,-	

Tabell 11.10: Rangering av seksjoneringsmetodikker i kabelnett-modell



# 12 | Diskusjon

## 12.1 Resultater

Resultatene av pålitelighetsanalysene viser at flere av seksjoneringsmetodikkene gir likt seksjoneringsforløp både for luftnett- og kabelnett-modellen. Dette skyldes hovedsakelig den forenklete strukturen av nettmodellene og symmetrien i nettspesifikasjonene. Både luftnett- og kabelnett-modellen består av enkle radialer uten avgreninger. Den enkle oppbyggingen av nettmodellene gir begrensninger i antall seksjoneringspunkter, noe som øker risikoen for at seksjoneringsmetodikker som baserer seg på ulike kriterier gir likt seksjoneringsforløp. For enkelhetskyld er også parametere som kundesammensetning, lengder, feilfrekvenser og belastninger symmetrisk oppbygd. Kundensammensetningen i luftnett-modellen er utformet slik at andelen av kunder med høye spesifikke avbruddskostnader er lokalisert nært transformatorstasjonen mens kunder med lave spesifikke avbruddskostnader er lokalisert ytterst på radialen. Dette for å illustrere tettbygd strøk i starten av radialen og grisgrendt strøk ytterst på radialen. Lengdene av kraftlinjene illustrerer også bebyggelsen i luftnett-modellen ved at de er korte i nærheten av transformatorstasjonen og øker utover radialen. I kabelnett-modellen er kundesammensetningen motsatt av luftnett-modellen. Andelen av kunder med høye spesifikke avbruddskostnader er stor ytterst på radialen og lav ved transformatorstasjonen, noe som illustrerer henholdsvis bykjerne og mindre bebygd strøk utenfor by. Lengdene av kabelstrekningene i kabelnett-modellen er lengst ved transformatorstasjonen og minker gradvis utover radialen.

Feilfrekvensene og belastningene benyttet i nettmodellene er konstante verdier. Uavhengig av lokasjon i nettmodell er feilfrekvensen for kraftlinjer 0.0371 feil/km år, mens for kabelstrekninger 0.05 feil/km år. Belastningene per nettstasjon er i luftnett-modellen lik 200kW, mens 500kW i kabelnett-modellen. I luftnett-modellen er det i tillegg utformet like mange nettstasjoner mellom lastbryterne slik at belastningen innenfor hver seksjon er like stor. Den forenklete strukturen av nettmodellene og symmetrien i nettspesifikasjoner gjør at følgende seksjoneringsmetodikker gir likt seksjoneringsforløp for luftnett- og kabelnett-modellen:

### **luftnett-modell:**

- halvering av lengde av radial - halvering av feilfrekvens
- halvering av antall nettstasjoner 1 - halvering av forventet KILE

### **kabelnett-modell:**

- halvering av antall nettstasjoner 1 - halvering av KILE-satser 1
- halvering av antall nettstasjoner 2 - halvering av KILE-satser 2
- halvering av lengde av radial - halvering av feilfrekvens

---

Pålitelighetsanalysene utført på luftnett- og kabelnett-modellen beskriver hvordan påliteligheten endres avhengig av valg av seksjoneringsmetode og/eller seksjoneringsmetodikk. I luftnett seksjoneres strømmettet kun ved hjelp av prøvekoblinger, og resultatene av pålitelighetsanalysene viser at det er seksjoneringsmetodikken *halvering av lengde av radial* som gir best pålitelighetsindekser og lavest forventet avbruddskostnader. De årlige forventede avbruddskostnadene er hele 3.4% lavere enn for seksjoneringsmetodikken *halvering av antall nettstasjoner 1* som gir nest lavest avbruddskostnader. Dette er relativt overraskende med tanke på seksjoneringsforløpene og kundesammensetningen i nettmodellen. Ved bruk av metodikken *halvering av antall nettstasjoner 1* vil seksjoneringen starte i seksjon 3, mens med metodikken *halvering av lengde av radial* i seksjon 4. For begge metodikkene vil neste bryter velges sekvensielt fra første seksjoneringspunkt avhengig av feillokasjon. Seksjoneringsmetodikken *halvering av antall nettstasjoner 1* vil derfor gi lavere avbruddsvarigheter for lastpunktene med høy spesifikk avbruddskostnad, og vice versa. Årsaken til at det likevel er metodikken *halvering av lengde av radial* som gir lavest avbruddskostnader er at feilsannsynligheten øker langs radialen. Det er med andre ord mye større sannsynlighet for at feil skal oppstå i bakre halvdel av nettmodellen, og derfor vil avbruddskostnadene være lavere ved bruk av denne metodikken. Selv om metodikken gir best pålitelighet og lavest avbruddskostnader fører den til høyest forventningsverdier for antall innkoblinger mot varige feil. De årlige forventningsverdiene i seksjon 1, 2, 3 og 4 er henholdsvis 32.3%, 34.4%, 42.5% og 73.4% høyere enn for metodikken *halvering av antall nettstasjoner 1*.

I kabelnett seksjoneres strømmettet både ved hjelp av prøvekoblinger og isolasjonsmålinger. Det er derfor utført separate analyser for hver av seksjoneringsmetodene. Resultatene av pålitelighetsanalysene viser at seksjonering ved hjelp av prøvekoblinger gir mye bedre pålitelighet og lavere årlige forventede avbruddskostnader enn for isolasjonsmålinger. Isolasjonsmålinger medfører derimot ingen innkoblinger mot varige feil. For seksjonering ved hjelp av prøvekoblinger er det seksjoneringsmetodikken *halvering av forventet KILE* som gir lavest årlig forventet avbruddskostnader etterfulgt av metodikken *halvering av antall nettstasjoner 1* og *halvering av lengde av radial*. De to førstnevnte metodikkene gir derimot klart høyest forventningsverdier for antall innkoblinger mot varige feil. Seksjoneringsmetodikken *halvering av lengde av radial* gir 4.0% høyere avbruddskostnader enn metodikken *halvering av forventet KILE*, men forventningsverdiene for innkobling mot varig feil er langt lavere. I seksjon 1, 2 og 3 er forventningsverdien henholdsvis 21.4%, 26.1% og 41.4% lavere. Resultatene av pålitelighetsanalysene for seksjonering ved hjelp av isolasjonsmålinger viser at seksjoneringsmetodikken *halvering av forventet KILE* gir lavest avbruddskostnader etterfulgt av metodikken *halvering av antall nettstasjoner 1*. Siden det ved bruk av isolasjonsmålinger ikke blir utført prøvekoblinger vil effektbryter kun utløses i det øyeblikket feilen inntreffer. Personikkerhet og kostnader tilknyttet innkoblinger mot varige feil er derfor ikke problematisk ved bruk av denne seksjoneringsmetoden. I resultatene av kabelnett-modellen viser det seg at gode pålitelighetsindekser ikke nødvendigvis resulterer i de laveste årlige forventede avbruddskostnadene. I flere tilfeller, både for prøvekoblinger og isolasjonsmålinger, gir enkelte seksjoneringsmetodikker gode pålitelighetsindekser, men de årlige forventede KILE-kostnadene er større enn for metodikker med dårligere pålitelighetsindekser.

Det fremkommer av resultatene for seksjonering ved hjelp av prøvekoblinger i luft- og kabelnett at seksjoneringsmetodikker med gode pålitelighetsindekser og lave forventede avbruddskostnader ofte gir høye forventningsverdier for innkoblinger mot varige feil. Innkoblinger mot varige feil og gjeninnkobling av store belastninger kan være opphav til fenomenene spenningsdipp, spenningsusymmetri og overspenninger. Spenningsfenomenene som oppstår underveis i seksjoneringen har negative innvirkninger for elektriske komponenter i strømmettet. Spenningsdipper kan blant annet føre til at elektriske komponenter ikke utfører sin

---

tiltenkte funksjon, eller at funksjonen begrenses på grunn av manglende tilført elektrisk energi. Dette kan føre til redusert nominell drift av motorer i strømmettet, og i verste fall utkoblinger av elektriske komponenter. De økonomiske innvirkningene fra spenningsdipper er store, spesielt i industrien. Her kan spenningsdipper medføre store kostnader forbundet med produksjonstap, utetid, svinn av uferdig produksjon, gjenoppretting av prosesser, ødeleggelse av elektrisk utstyr eller avbruddskostnader. Fenomenet spenningsusymmetri medfører ytterligere effekt- og energitap, samt redusert overføringsevne som følge av varmetap. Det har også negative innvirkninger på induksjonsmotorer, synkrongeneratorer og likerettere ved at varme- og effektapet øker, samt harmoniske og interharmoniske svingninger kan oppstå. Overspenningene som kan oppstå ved bryting av små induktive strømmer skader i hovedsak ikke komponentene i det høyspente distribusjonsnettets da de er dimensjonert for dem. Fenomenet kan derimot føre til skader og ødeleggelse av elektriske apparater i det lavspente distribusjonsnettets. I tillegg til de direkte økonomiske innvirkningene, kan spenningsfenomenene føre til indirekte- og sosialøkonomiske innvirkninger. Eksempler på dette kan være kostnader forbundet med utsatt inntekter, tap av markedsandeler, kostnader tilknyttet gjenoppretting av merkeverdi eller redusert arbeidseffektivitet som følge av dårlig personsikkerhet og/eller arbeidsmiljø. Spenningsforstyrrelsene som oppstår på feilbefengt radial vil også kunne forplante seg videre til friske deler av strømmettet og dermed øke skadeomfanget.

De store feilstrømmene og kreftene som oppstår ved innkoblinger mot varige feil kan også redusere levetiden av komponenter som følge av aldringsmekanismer styrt av termisk, mekanisk og elektrisk stress. Transformatorer, effektbrytere og kraftkabler er spesielt utsatt for aldringsmekanismer. Transformatorer i nettstasjoner blir blant annet utsatt for aldring av viklinger, tanker og trinnkoblere grunnet vibrasjoner og overbelastning, mens effektbrytere blir utsatt for materialtretthet og deformering forårsaket av vibrasjoner og kortslutninger. I kraftkabler er det korrosjon som er den dominerende aldringsprosessen. Mengden av korrosjon er avhengig av faktorer som fuktighet, salt, vind og is, samt hvor ofte det utføres vedlikehold. Urenheter og endringer i krystallinsk struktur kan også oppstå i kraftkabler, noe som kan føre til skader som følge av partielle utladninger, formasjon av vannre og elektriske tre eller termo-kjemiske prosesser. Kortslutningsstrømmene som oppstår ved innkoblinger mot feil kan potensielt øke risikoen tilknyttet personsikkerhet. Personsikkerheten ved bruk av prøvekoblinger vil derfor være lavere enn for isolasjonsmålinger.

I og med at innkoblinger mot feil som følge av prøvekoblinger har så mange potensielle baksider, er det ikke nødvendigvis seksjoneringsmetodikkene som gir lavest forventet avbruddskostnader som er optimal. Årlig antall forventede innkoblinger mot varig feil må også tas med i vurderingen av optimal seksjoneringsmetodikk. Ideelt sett må de direkte- og indirekte økonomiske innvirkningene tilknyttet de nevnte kriteriene kvantifiseres, og kriteriefunksjoner må etableres med hensyn på vektiglegging av kriteriene ut fra viktighet. Siden flere av kriteriene er motstridende, eksempelvis årlig forventet avbruddskostnader og antall innkoblinger mot feil, kan kriteriene optimaliseres med en multi-objektiv optimalisering for gitte begrensninger og forutsetninger. I denne oppgaven er hovedfokuset rettet mot pålitelighetsanalyser og etablering av seksjoneringsmetodikker. De direkte- og indirekte økonomiske innvirkningene av spenningsfenomener, aldring av komponenter og personsikkerhet er ikke kvantifisert, og det er dermed ikke etablert kriteriefunksjoner og utført optimaliseringsanalyser. Årsaken til at de økonomiske innvirkningene ikke er kvantifisert er manglende datagrunnlag. Selv om det er kjent at bryte- og kortslutninger, kortslutninger og inn- og utkoblinger av store laster kan gi opphav til spenningsfenomener, ble det under litteraturstudiet ikke funnet statistikk som viser i hvor stor grad spenningsfenomener er forårsaket av prøvekoblinger i strømmettet. Andelen av spenningsforstyrrelser som er av en slik karakter at de antas å medføre skade på utstyr eller gi andre problemer til sluttbrukere som følge av prøvekoblinger er også ukjent. Kvantifiseringen av

---

de økonomiske innvirkningene grunnet spenningsfenomener er derfor ikke inkludert, selv om det foreligger analyser av potensiell økonomisk konsekvens forbundet med spenningsforstyrrelser, hvor estimerte kostnadsfunksjoner for ulike kundegrupper er etablert basert på spørreundersøkelser gitt til husholdninger, private bedrifter og offentlige tjenester. Aldring av komponenter som følge av termiske, mekaniske og elektriske påkjenninger er også en kjent problematikk i elkraftteknikken, og det foreligger en rekke estimeringsmodeller av levetider. Det ble imidlertid ikke funnet noen levetidsestimater som er direkte tilknyttet innkoblinger mot varige feil. Estimaten som var tilknyttet elektriske påkjenninger var forbundet med overbelastning av komponenter. Om dette tyder på at elektriske komponenter ikke påvirkes i den stor grad av prøvekoblinger, eller om dette er noe som tilfeldigvis ikke har fått oppmerksomhet tidligere er uvisst. I forbindelse med personsikkerhet ble det i likhet med aldring av komponenter ikke funnet noe statistisk grunnlag som gjorde kvantifisering gjennomførbar.

Optimal seksjoneringsmetodikk i denne oppgaven baserer seg stort sett på resultatene av pålitelighetsanalysene, og da med fokus på de årlige forventede avbruddskostnadene. De ikke-kvantifiserte kriteriene for seksjonering vil likevel inngå i vurderingene av de ulike seksjoneringsmetodikkene, men siden tallfestede verdier avviker, inngår kun drøfting i evalueringen. Av denne grunn trekkes ikke konklusjoner av optimal seksjoneringsmetodikk for seksjonering ved bruk av prøvekoblinger, men metodikker anbefales.

I tilfeller hvor kabelnettet seksjoneres ved hjelp av isolasjonsmålinger kan metodikken *halvering av forventet KILE* sies å være optimal da det ikke forekommer noen ekstra økonomiske innvirkninger, samt personsikkerheten ivaretas. For seksjonering ved hjelp av prøvekoblinger er det metodikken *halvering av forventet KILE* som gir lavest avbruddskostnader i kabelnett-modellen, mens metodikken *halvering av lengde av radial* i luftnett-modellen. Disse metodikkene er ikke dermed sagt å være optimale da andre seksjoneringsmetodikker med litt høyere avbruddskostnader gir langt lavere forventningsverdier for innkobling mot varige feil. Blant annet gir metodikken *halvering av lengde av radial* 4.0% høyere avbruddskostnader i kabelnett-modellen, mens metodikken *halvering av forventet KILE* 3.5% høyere avbruddskostnader i luftnett-modellen, og dette med forventningsverdier som er mellom 21.4 - 41.3% lavere i de tre første seksjonene. Metodikkene som gir de laveste årlige forventede avbruddskostnadene anbefales, men de nevnte metodikkene med lavere forventningsverdier for innkoblinger mot feil anses som veldig gode alternativer.

## 12.2 Følsomhetsanalyse

Følsomhetsanalysen viser at skalering av total lengde av radial og feilfrekvenser av kraftlinjer og kabelstrekninger ikke påvirker utfallet for noen av nettmodellene, se figur 11.1 – figur 11.4. Dersom lengdene og feilfrekvensene reduseres vil forskjellene i årlig forventede avbruddskostnader for de ulike seksjoneringsmetodikkene minke. Dette er naturlig da en reduksjon i lengder vil gi mindre forskjeller i avbruddsvarigheter, mens en reduksjon i feilfrekvens vil gi færre antall årlige avbrudd. På samme vis vil en økning av parameterne gi større synlige variasjoner i de årlige forventede avbruddskostnadene for de ulike seksjoneringsmetodikkene. Figurene viser også at det forekommer knekkpunkter ved skalering av parameterne. Skaleringen av lengdene og feilfrekvensene fører til at de gjennomsnittlige avbruddsvarighetene( $r$ ) endres. Knekkpunktene kommer som et resultat av de ikke-kontinuerlige kostnadsfunksjonene for beregning av spesifikke avbruddskostnader som følge av endringer i gjennomsnittlig avbruddsvarigheter.

---

Endringene av kundesammensetningen i nettmodellene påvirker kun seksjoneringsforløpet til seksjoneringsmetodikkene *halvering av KILE-satser* og *halvering av forventet KILE*. Følgende seksjoneringsmetodikker gir likt seksjoneringsforløp i luftnett- og kabelnett-modellen som følge av endringen i kundesammensetning:

**luftnett-modell:**

halvering av lengde av radial  
halvering av feilfrekvens  
halvering av KILE-satser  
halvering av forventet KILE

**kabelnett-modell:**

halvering av lengde av radial  
halvering av feilfrekvens

I luftnett-modellen gir de fire metodikkene med likt seksjoneringsforløpet best pålitelighet og lavest avbruddskostnader, men samtidig klart høyest forventningsverdier for innkoblinger mot varige feil, se tabell 11.5 og tabell 11.6. Sammenlignet med metodikken *halvering av antall nettstasjoner 1* som gir nest best pålitelighet, er de årlige forventede avbruddskostnadene 5.2% lavere mens forventningsverdiene i seksjon 1, 2 og 3 er henholdsvis 32.3%, 34.3% og 42.5% høyere. I likhet med de originale resultatene er det vanskelig å definere den optimale seksjoneringsmetodikken da de økonomiske innvirkningene for innkoblinger mot feil ikke er kvantifisert. Siden de årlige KILE-besparelsene for de fire nevnte metodikkene er såpass stor, antas disse å være optimale seksjoneringsmetodikker for gitt nettmodell og nettspesifikasjoner.

I kabelnett-modellen fører endringene i kundesammensetningen til at seksjoneringsmetodikken *halvering av lengde av radial* gir lavest avbruddskostnader etterfulgt av metodikken *halvering av forventet KILE* for både prøvekoblinger og isolasjonsmålinger. For seksjonering ved hjelp av isolasjonsmålinger antas metodikken *halvering av lengde av radial* å være optimal. For seksjonering ved hjelp av prøvekoblinger fører metodikken til at de årlige forventede avbruddskostnadene er 1.1% lavere enn for metodikken *halvering av forventet KILE*, men forventningsverdien i seksjon 1, 2 og 3 er henholdsvis 12.8%, 17.2% og 41.2% høyere. I og med at de årlige KILE-besparelsene er såpass lave anbefales begge metodikkene for gitt nettmodell og nettspesifikasjoner.

Det fremkommer av følsomhetsanalysene at resultatene av pålitelighetsanalysene ikke påvirkes av skaleringer av parametere som lengder og feilfrekvens. Individuelle endringer av parametere vil derimot kunne føre til store endringer da det påvirker seksjoneringsforløpet for enkelte seksjoneringsmetodikker. Resultatene viser også at optimal seksjoneringsmetodikk er svært avhengig av kundesammensetningen i nettmodellene. De gjennomsnittlig spesifikke avbruddskostnadene som beregnes ut fra kundesammensetningen kan derfor sies å være en svært viktig parameter for evaluering av optimal seksjoneringsmetodikk.

## 12.3 Forutsetninger og forenklinger

I og med at pålitelighetsanalysen er utført på fiktive nettmodeller er det gjort en rekke forutsetninger og forenklinger som medfører usikkerheter i resultatene. For å benytte seg av realistiske verdier er datagrunnlaget delvis basert på landsdekkende gjennomsnittsverdier for feilfrekvens og reparasjonstider. Statistikk vedrørende feilfrekvens for kraftlinjer er hentet fra “*Årsstatistikk 2016 - Driftsforstyrrelser og feil i det norske distribusjonsnettet, 1-22kV*”, mens reparasjonstider baserer seg på “*FASIT 2006 - Feil og avbrudd i høyspennings fordelingsnett t.o.m. 22 kV*”. Det er i midlertid valgt å benytte litt høyere verdier for

---

feilfrekvensen på kabelstrekninger og reparasjonstid for kraftlinjer enn fra [24] og [41]. Dette er gjort for å få større synlige forskjeller i årlige forventede avbruddskostnader for de ulike seksjoneringsmetodikkene. Reparasjonstiden av kabelstrekninger er neglisjert da lastpunkter i kabelnett-modellen gjenoppretter forsyningen før selve feilsøkingen og reparasjon av kabelstrekningen utføres. Tiden brukt til feilsøking og reparasjon av kraftkabler har derfor ingen innvirkninger på resultatene i pålitelighetsanalysene. I forsøk på å akkumulere oppdaterte og realistiske verdier av feilhåndteringstider tilknyttet seksjonering i distribusjonsnettet ble Jørn Heggseth, forfatter av nevnt kilde “FASIT 2006” kontaktet. Ifølge Jørn Heggseth finnes det ingen nasjonale anslag for feilsøking- og reparasjonstider. I FASIT-registreringen er disse funksjonaliteten frivillige, noe som har medført at registrering av feilhåndteringstider ikke har vært prioritert av nettselskaper de siste 10 årene [42]. Feilfrekvensene benyttet i pålitelighetsberegningene er også årlige gjennomsnittsverdier. For å minimere usikkerheten tilknyttet resultatene er det vesentlig å benytte seg av tidsvarierende verdier da feilfrekvensen varierer avhengig av ytre påkjenninger. For et utstrakt strømmnett vil like komponenter kunne ha svært forskjellig feilfrekvens avhengig av lokasjon.

Forventet ILE og KILE i nettmodellene er beregnet uten at det er tatt hensyn til tidsvariasjoner av lastkurver. Beregningene baserer seg på antatte gjennomsnittlige verdier over året da strømmettet er fiktivt og faktiske verdier ikke foreligger. De spesifikke avbruddskostnadene tilknyttet de ulike kundegruppene er en funksjon av belastning i gitt lastpunkt i referansetidspunktet. I pålitelighetsanalysen er det antatt at belastningen på referansetidspunktet er tilnærmet lik maksimal belastning av fordelingstransformatorene, noe som også er en svakhet.

Siden det ikke foreligger noe datagrunnlag for feilhåndteringstider tilknyttet seksjonering av luft- og kabelnett fra registreringer i FASIT, er det benyttet estimer basert på innsamlede verdier. De estimerte feilhåndteringstidene benyttet i pålitelighetsanalysene baserer seg på subjektive vurderinger gitt fra driftspersonell i nettselskapene BKK Nett, TrønderEnergi Nett og NTE Nett. Feilhåndteringstidene anses å være relativt realistiske da tallverdiene baserer seg på operatørers og montørers tidligere erfaringer. For å gjøre tidsaspektet ved feilrettingsforløpet så realistisk som mulig er det forsøkt å kombinere flest mulig tidsparametere. Tidsparameteren som muligens fører til størst usikkerhet er utrykningstiden. Utrykningstiden er tiden fra montør blir kontaktet av operatør ved feilsituasjoner til montør er lokalisert ved første seksjoneringspunkt, klar til å utføre første manuelle seksjonering. Uavhengig av hvor i nettmodellen første seksjoneringspunkt er lokalisert, vil utrykningstiden være den samme. Årsaken til dette er at lokasjonen til montør er uvis i forkant av feilsituasjoner.

I forbindelse seksjoneringsmetodikkene *halvering av KILE-satser* og *halvering av forventet KILE* er de beregnede KILE-satsene svært sentrale. KILE-satsene er ved hjelp av kundesammensetningen og belastningene i de ulike seksjonene beregnet ut fra de spesifikke kostnadsfunksjonene fra tabell 2.1. For enkelhetsskyld er det valgt å benytte en avbruddsvarighet ( $r$ ) lik 1 time. Denne forenklingen medfører store usikkerheter da avbruddsvarigheten på en time ikke representerer gjennomsnittlig avbruddsvarighet for nettmodellene.

## 12.4 Seksjoneringsmetodikker

Underveis i litteraturstudiet ble det erfart at nettselskaper seksjonerer luft-, kabel- og blandet nett forskjellig fra hverandre. Til og med innad i nettselskaper kan seksjoneringen utføres forskjellig siden det vanligvis foreligger prosedyrer for seksjonering av distribusjonsnettet på et veldig overordnet og generelt nivå. Valg av seksjoneringsmetode og seksjoneringsmetodikk gjenspeiler ofte hvilke kriterier som prioriteres av hvert enkelt nettselskap. Tabell 6.1 viser en

---

oppsummering av seksjoneringsmetodene og de underliggende seksjoneringsmetodikkene som benyttes av BKK nett, TrønderEnergi Nett og NTE Nett avhengig av nettype og feiltype. Tabellen viser at de tre nettselskapene seksjonerer det høyspente distribusjonsnett ved veldig ulikt. Personssikkerhet er selvsagt høyt oppe på prioriteringslisten til alle nettselskapene, men det finnes ulike måter å ta hensyn til personssikkerhet, og enkelte tiltak er muligens sikrere enn andre. Nettselskapene gjør blant annet nøye vurderinger av personssikkerhet før eventuelle prøvekoblinger utføres ved at operatør på nettsentralen benytter et prøvekoblingsskjema for å evaluere om det er forsvarlig. Prøvekoblingsskjemaet inkluderer faktorer som feiltype, feiltidspunkt og værforhold, og dersom det anses som uforsvarlig avventes koblingssekvensen. Merkelig er det at kun ett av nettselskapene tar hensyn til personssikkerhet ved å verne og begrense påkjenninger av komponenter gjennom valg av seksjoneringsmetodikk. Nettselskapet 1 fra delkapittel 6.1 gjør dette ved å seksjonere luftnett sekvensiell ved kortslutningsfeil, samt alltid benytte isolasjonsmålinger for kabelnett og adskilt nettstruktur i blandet nett. Resultatene av pålitelighetsanalysene viser at bruk av metodikken *sekvensiell seksjonering* i luftnett gir dårligst pålitelighet og høyest forventede avbruddskostnader. Samtidig gir seksjonering ved hjelp av isolasjonsmålinger i kabelnett mye større avbruddskostnader enn seksjonering ved hjelp av prøvekoblinger, da tidsbruken er vesentlig større. Nettselskapet er med andre ord villig til å øke avbruddskostnadene for å opprettholde høy personssikkerhet og minimere de termiske, mekaniske og elektriske påkjenningene av komponenter som oppstår ved innkoblinger mot varige feil. Selv om nettselskap 1 har stort fokus på å ivareta personssikkerhet og verne komponenter er det oppsiktsvekkende at de i enkelte tilfeller i blandet nett går bort fra prinsippene sine. Den første seksjoneringen i blandet nett går ut på å skille luft- og kabelnettet fra hverandre. Denne seksjoneringen utføres ved hjelp av prøvekoblinger da tidsbesparelsen er vesentlig, og feil mest sannsynlig er lokalisert i luftnett. Avhengig av hvilken nettype som er lokalisert nærmest transformatorstasjonen risikerer nettselskapet å utsette kabelnettet for store kortslutningsstrømmer som følge av innkobling mot varig feil. I tilfeller hvor feil er lokalisert i luftnett-delen fortsetter seksjoneringen ved bruk av prøvekoblinger, og på denne måten kan kabelnett-delen bli utsatt gjentatte innkoblinger mot varige feil.

De underliggende seksjoneringsmetodikkene følges sjeldent til punkt og prikke da svært mange faktorer påvirker seksjoneringsforløpet. Ofte er det slik at seksjoneringsmetodikken endrer seg underveis i seksjoneringen ettersom mer informasjon er tilgjengelig og nettstrukturen forandres. Felles for alle nettselskaper er at i den grad fjernstyrte brytere eksisterer benyttes disse først uavhengig av feiltype og nettype, da tidsbesparelsen er vesentlig. Nettselskapene prioriterer å gjenopprette forsyningen raskest mulig der hvor det står om liv og helse. Seksjoneringen og feilsøkingen er svært personavhengig, og baserer seg ofte på lokale geografiske kunnskaper, tidligere erfaringer og magefølelser. Andre viktige faktorer som operatør på nettsentralen må ta i betraktning er værforhold, topografi, nettverkstopologi, bryterkonfigurasjon og tilgjengelighet. I tillegg skal sikkerheten til montører i felt bevares. Seksjoneringen påvirkes derfor av risiko tilknyttet arbeid på ukjent anlegg, tilgjengelighet på kommunikasjon, lange arbeidsdager og befarung i mørket. Alle disse faktorene er svært vanskelig å inkludere i pålitelighetsanalyser grunnet mangel på datagrunnlag, samtidig som analysen blir svært kompleks. Disse faktorene er neglisjert i analysene utført i denne oppgaven, noe som medfører store usikkerheter tilknyttet seksjoneringsforløpene. De definerte seksjoneringsmetodikkene blir i alle analysene fulgt slavisk, da det antas at nevnte faktorer er utilgjengelige eller ikke har betydning.

## 13 | Konklusjon

Pålitelighetsanalysene i denne oppgaven er utført på to fiktive nettmodeller som illustrerer et forenklet 22kV luftnett og et 11kV kabelnett uten avgreninger. Nettmodellene er utarbeidet i samarbeid med veileder Kjell Sand og medveileder Line Bergfjord i BKK Nett.

For å vurdere optimal seksjoneringsmetodikk i nettmodellene er det utført pålitelighetsanalyser basert på RELRAD-metoden. I luftnett seksjoneres strømmettet kun ved hjelp av prøvekoblinger, mens i kabelnett kan både prøvekoblinger og isolasjonsmålinger benyttes. Det er derfor utført separate pålitelighetsanalyser av de ulike seksjoneringsmetodikkene for hver av de to seksjoneringsmetodene.

Det fremkommer av resultatene at for seksjonering ved hjelp av isolasjonsmålinger i kabelnett-modellen er det metodikken *halvering av forventet KILE* som er optimal da den gir god pålitelighet og lavest avbruddskostnader, samtidig som personsikkerheten ivaretas og det ikke forekommer noen ekstra økonomiske innvirkninger. For seksjonering ved bruk av prøvekoblinger er det er metodikkene *halvering av lengde av radial* og *halvering av feilfrekvens* som gir de laveste avbruddskostnadene i luftnett-modellen, mens metodikken *halvering av forventet KILE* i kabelnett-modellen. Selv om metodikkene gir god pålitelighet og lave årlige forventede avbruddskostnader gir de relativt høye forventningsverdier for innkoblinger mot varige feil. Innkoblinger mot varige feil gir store feilstrømmer som potensielt påvirker personsikkerheten og kan medføre direkte og indirekte kostnader tilknyttet fenomenene spenningsdipp, spenningsusymmetri, overspenninger og aldring av komponenter. Seksjoneringsmetodikkene er derfor ikke nødvendigvis optimale da andre metodikker med litt høyere avbruddskostnader gir langt lavere forventningsverdier for innkobling mot feil. I og med at de direkte og indirekte økonomiske innvirkningene tilknyttet kriteriene ikke er kvantifisert konkluderes det ikke med at en bestemt seksjoneringsmetodikk er optimal for seksjonering ved hjelp av prøvekoblinger. Metodikkene som gir lavest avbruddskostnader anbefales, men metodikker som gir litt høyere avbruddskostnader og langt lavere forventningsverdier anses også som veldig gode alternativer. Optimal seksjoneringsmetodikk vil alltid være en avveining mellom fordeler og ulemper, og kan variere avhengig av nettselskapers retningslinjer for ivaretagelse av personsikkerhet og verving av komponenter.

Følsomhetsanalysen viser at lineære skaleringer av parametere som lengde av radial og feilfrekvenser ikke påvirker utfallet av resultatene. Endringer i kundesammensetning i nettmodellene har derimot stor påvirkning på resultatene av pålitelighetsberegningene. Seksjoneringsmetodikkene *halvering av KILE-satser* og *halvering av forventet KILE* blir direkte påvirket da metodikkene bygger på KILE-satsene som er beregnet ut fra kostnadsfunksjonene for de ulike kundegruppene. I luftnett-modellen fører endringene til at de to nevnte seksjoneringsmetodikkene gir likt seksjoneringsforløp som metodikken *halvering av lengde av radial* og *halvering av feilfrekvens*, som også gir best pålitelighet og lavest avbruddskostnader. I kabelnett-modellen medfører endringene at de to nevnte seksjoneringsmetodikkene gir to helt nye seksjoneringsforløp. Både for seksjonering ved hjelp av prøvekoblinger og isolasjonsmålinger i kabelnett-modellen er det metodikken *halvering av lengde av radial* og *halvering av feilfrekvens*



---

som gir best pålitelighet og lavest avbruddskostnader. I likhet med de originale resultatene er det likevel andre seksjoneringsmetodikker som gir litt høyere avbruddskostnader, men langt lavere forventningsverdi for innkobling mot varige feil ved bruk av prøvekoblinger. Optimal seksjoneringsmetodikk vil derfor være en individuell vurdering av fordelene og ulempene siden de medvirkende konsekvensene av innkoblinger mot feil ikke er kvantifisert.

Resultatene av pålitelighetsanalysene viser at analyser av seksjoneringsmetodikker er nødvendige da metodikkene som benyttes i virkeligheten ikke nødvendigvis gir best resultater. Det er heller ikke slik at seksjoneringsmetodikkene som gir lavest årlig forventede avbruddskostnader er optimal da økonomiske innvirkninger grunnet innkoblinger mot feil også må tas med i vurderingen. Etablert metodikk kan benyttes for liknende nettkonfigurasjoner med de samme forutsetningene. Eventuelle utvidelser eller endringer av nettstrukturer vil medføre modifisering av regneark i Excel.

## 14 | Videre arbeid

Nettmodellene benyttet i denne oppgaven representere forenklete luftnett- og kabelnett-modeller. I virkeligheten består store deler av høyspennings distribusjonsnett av en kombinasjon av luft- og kabelnett, såkalt blandet nett. Nettstrukturen er samtidig mye mer komplekst da strømmettet som regel består av flere avgreninger og muligheter til innkoblinger fra alternative forsyningsveier. Nettmodellene bør i videre arbeid videreutvikles og utvides for å verifisere resultatene av analysene, samtidig som mer reelle nettmodeller vil tilføre resultatene mer økonomisk verdi for nettselskaper.

I mindre strømmett kan det tenkes at det vil være lønnsomt å etablere predefinerte feillokaliseringprosedyrer basert på bruk av pålitelighetsanalyser, da det viser seg at enkelte metodikker i bestemte tilfeller gir langt bedre pålitelighet og lavere årlige avbruddskostnader. Individuelle endringer i nettspesifikasjoner påvirker også lønnsomheten av de ulike seksjoneringsmetodikkene. Det vil derfor være ulønnsomt å basere valg av seksjoneringsmetodikk på nettype og feiltype slik som nettselskaper gir uttrykk for at de gjør.

Det er en rekke usikkerheter tilknyttet resultatene av pålitelighetsberegningene grunnet alle antagelsene og forenklingene. For å øke validiteten av resultatene bør antall forutsetninger og forenklinger reduseres. Det er blant annet antatt at effektbryter, fordelingstransformator, lastskillebryter og høyeffektsikringer er 100% pålitelige. Alle disse komponentene har en gitt feilfrekvens, og disse bør inkluderes i videreutvikling av etablert metodikk. Feilfrekvensene påvirker resultatene i stor grad, og det må derfor foreligge et godt datagrunnlag for pålitelighetsdata. Under innsamling av data ble det erfart at nettselskaper har relativt lite og udetaljert pålitelighetsdata. Nettselskaper anbefales derfor å starte å registrere feilhendelser i strømmettet mer detaljert, da godt datagrunnlag er nødvendig i pålitelighetsanalyser. Det ble også erfart at det foreligger relativt lite informasjon tilknyttet feilhåndteringstider. Kartlegging av tider tilknyttet utrykning, bryterkoblinger, transport og reparasjon av komponenter er i likhet med god pålitelighetsdata svært viktig for validiteten av pålitelighetsanalyser.

For å kunne vurdere de alternative seksjoneringsmetodikkene opp mot hverandre er det nødvendig å ha en formening om kostnader tilknyttet redusert spenningskvalitet, aldring av komponenter og personsikkerhet. Siden de økonomiske innvirkningene ikke er kvantifisert i denne oppgaven, bør dette undersøkes nærmere i videre arbeid. Under litteraturstudiet ble det erfart at det foreligger estimerte kostnadsfunksjoner som følge av under- og overspenninger basert på omfattende spørreundersøkelser, men i hvor stor grad en kan koble disse opp mot prøvekoblinger som seksjoneringsmetode i distribusjonsnett er uvisst. Det bør likevel undersøkes hvorvidt kostnader tilknyttet redusert spenningskvalitet, aldring av komponenter og personsikkerhet utgjør betydelige summer eller ikke.

Etablert metodikk baserer seg på manuelle beregninger i Excel. I videre arbeid bør beregninger av gjennomsnittlig avbruddsvarigheter for de presenterte seksjoneringsmetodikkene automatiseres, da dette er svært tidkrevende arbeid. Endringer i struktur av nettmodeller medfører også modifikasjoner av flytskjema og etablert metodikk.

# Bibliografi

- [1] Referansegruppe for feil og avbrudd. *Definisjoner - knyttet til feil og avbrudd i det elektriske kraftsystemet*, 2001. <http://fasit.nsp01cp.nhosp.no/getfile.php/fasit.no/Definisjoner/definisjoner.pdf> [Lest: 15.01.2018].
- [2] International Electrotechnical Commission. *The World's Online Electrotechnical Vocabulary*. <http://www.electropedia.org/> [Lest: 15.01.2018].
- [3] E. H. Olsen. *Optimal investering i fjernstyrte brytere og overvåkning i distribusjonsnettet*, 2017. Fordypningsprosjekt.
- [4] Olje og energidepartementet. *Reguleringsmyndigheten for energi(RME)-marked og monopol*, 2018. <https://www.nve.no/reguleringsmyndigheten-for-energi-rme-marked-og-monopol/> [Lest: 13.05.2018].
- [5] Norges vassdrags-og energidirektorat. *2001: Innføring av "KILE-ordningen*, 2015. <https://www.nve.no/om-nve/vassdrags-og-energihistorie/nves-historie/2001-innforing-av-kile-ordningen/> [Lest:02.05.2018].
- [6] M. Heien, R. Sergieva, P. Melvær, and T. Sliwinski. *Utvikling i nøkkeltal for nettselskap*, 2017. Norges vassdrags- og energidirektorat (NVE).
- [7] Norges vassdrags-og energidirektorat. *1991: Den nye energiloven - fra forvaltning til forretning*, 2016. <https://www.nve.no/om-nve/vassdrags-og-energihistorie/nves-historie/1991-den-nye-energiloven-fra-forvaltning-til-forretning/> [Lest:02.05.2018].
- [8] Norges vassdrags-og energidirektorat. *Lov om produksjon, omforming, overføring, omsetning, fordeling og bruk av energi m.m. (energiloven)*, 1991. <https://lovdata.no/dokument/NL/lov/1990-06-29-50> [Lest:02.05.2018].
- [9] SINTEF Energi. *Planbok for kraftnett*, chapter Leveringspålitelighet, pages 2–43. 2010.
- [10] EnergiNorge. *Inntektsrammereguleringen - Nettselskapenes utfordringer og insentiver*, 2009.
- [11] Norges vassdrags-og energidirektorat. *Kvalitetsinsentiver - KILE*, 2016. <https://www.nve.no/elmarkedstilsynet-marked-og-monopol/okonomisk-regulering-av-nettselskap/reguleringsmodellen/kvalitetsinsentiver-kile/> [Lest:03.05.2018].
- [12] Norges vassdrags-og energidirektorat. *Kostnadsnormen*, 2018. <https://www.nve.no/reguleringsmyndigheten-for-energi-rme-marked-og-monopol/okonomisk-regulering-av-nettselskap/reguleringsmodellen/kostnadsnormen/> [Lest:03.05.2018].
- [13] Norges vassdrags-og energidirektorat. *Inntektsrammer*, 2018. <https://www.nve.no/reguleringsmyndigheten-for-energi-rme-marked-og-monopol/okonomisk-regulering-av-nettselskap/inntektsrammer/> [Lest:03.05.2018].

- 
- [14] SINTEF Energi. *Planbok for kraftnett*, chapter Avbruddskostnader, pages 6–32. 2010.
- [15] Olje og energidepartementet. *Forskrift om økonomisk og teknisk rapportering, inntektsramme for nettvirksomheten og tariffier*, 2017. <https://lovdata.no/dokument/SF/forskrift/1999-03-11-302> [Lest: 17.01.2018].
- [16] G. Kjølle. *KILE-satser og hva de dekker*, 2011. Lest: 20.01.2018.
- [17] R.N. Allan et al. *Reliability evaluation of power systems*. Springer Science & Business Media, 2013.
- [18] V. V. Vadlamudi. *Forelesningsnotater i ELK-10 e.l. , RELRAD-Methodology For Distribution System Reliability*, 2017. Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet - NTNU.
- [19] G. Kjølle and K. Sand. Relrad-an analytical approach for distribution system reliability assessment. In *Transmission and Distribution Conference, 1991., Proceedings of the 1991 IEEE Power Engineering Society*, pages 729–734. IEEE, 1991.
- [20] S. Svarte and J. H. Sebergsen. *Energiproduksjon og energidistribusjon - Produksjon, nettsystemer og beregninger*. 7th edition. Gyldedal, 2013.
- [21] L. Bergfjord. *mailkorrespondanse og tilsendt interne dokumenter fra BKK*, 2017.
- [22] G. Solum. *mailkorrespondanse og tilsendt interne dokumenter fra Trønder Energi*, 2017.
- [23] V. Frøstad and O. Stavrum. *mailkorrespondanse og telefonsamtale med Vidar Frøstad og Oddvar Stavrum i NTE*, 2017.
- [24] Statnett. *Årsstatistikk 2016 - Driftforstyrrelser og feil i det norske distribusjonsnettet, 1-22kV*, 2017. <http://www.statnett.no/Global/Dokumenter/Kraftsystemet/Systemansvar/Feilstatistikk/%C3%85rsstatistikk%202016%201-22%20kV.pdf> [Lest: 24.01.2018].
- [25] Statnett. *Årsstatistikk 2010 til 2016 - Driftforstyrrelser og feil i det norske distribusjonsnettet, 1-22kV*, 2017. <http://www.statnett.no/Kraftsystemet/Nedlastingscenter/Feilstatistikk/> [Lest: 01.02.2018].
- [26] E. Trømborg. *Trær til besvær*. Norges vassdrags- og energidirektorat, 2012.
- [27] Summer intern Powel 2017. *Spørreundersøkelse for nettselskaper om vegetasjon rundt høyspennings luftnett*. [Utsendt: 23.01.2018].
- [28] Norges vassdrags-og energidirektorat. *Områdekonsesjon*, 2018. <https://www.nve.no/energiforsyning-og-konsesjon/nett/omradekonsesjon/> [Lest: 26.01.2017].
- [29] Electrical Mastar online electrical library. *How to do Insulation Resistance Test using Megger*, 2017. <http://www.electricalmastar.com/measure-insulation-resistance-value/> [Lest: 26.05.2018].
- [30] H.M Vefsnmo and S.H. Jakobsen. *Arbeidsprosessbeskrivelse for dagens og morgendagens feil- og avbruddshandtering*, 2013. Lest: 20.01.2018.
- [31] Olje og energidepartementet. *Forskrift om systemansvaret i kraftsystemet*, 2010. <https://lovdata.no/dokument/SF/forskrift/2002-05-07-448> [Lest: 16.01.2018].
- [32] T. Hermansen. *Møte, mailkorrespondanse og tilsendte interne dokumenter og prototype fra prosjektet FASaD, SINTEF Energi*, 2017.
-

- 
- [33] Kalyanmoy Deb. Multi-objective optimization. In *Search methodologies*, pages 403–449. Springer, 2014.
- [34] Olje og energidepartementet. *Forskrift om leveringskvalitet i kraftsystemet*, 2010. <https://lovdata.no/dokument/SF/forskrift/2004-11-30-1557> [Lest: 21.02.2018].
- [35] K. Sand. *Forelesningsnotater i ELK-10 e.l.*, 2017. Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet - NTNU.
- [36] K. Samdal. *Sluttbrukeres kostnader forbundet med avbrudd og spenningsforstyrrelser*. SINTEF Energi, 2004.
- [37] Angelo Baghini. *Handbook of power quality*. John Wiley & Sons, 2008.
- [38] Xiang Zhang, Ernst Gockenbach, Volker Wasserberg, and Hossein Borsi. Estimation of the lifetime of the electrical components in distribution networks. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 22(1):515–522, 2007.
- [39] DS Bai and SW Chung. An accelerated life test model with the inverse power law. *Reliability Engineering & System Safety*, 24(3):223–230, 1989.
- [40] Olje og energidepartementet. *Forskrift om elektriske forsyningsanlegg*, 2006. <https://lovdata.no/dokument/SF/forskrift/2005-12-20-1626> [Lest: 26.04.2018].
- [41] Statnett. *FASIT 2006 - Feil og avbrudd i høyspennings fordelingsnett t.o.m. 22 kV*. <https://http://www.statnett.no/Global/Dokumenter/Kraftsystemet/Systemansvar/Feilstatistikk/%C3%85rsstatistikk%202016%201-22%20kV.pdf> [Lest: 24.01.2018].
- [42] Statnett SF. *Mailkorrespondanse med Jørn Heggseth*.

# Vedlegg

## Vedlegg A: Korreksjonsfaktorer

Følgende tabeller viser korreksjonsfaktorer for de ulike kundegruppene for korrigerings av referansetidspunkt.

<i>Måned</i>	<i>Jordbruk</i>	<i>Husholdning</i>	<i>Industri</i>	<i>Handel og tjenester</i>	<i>Offentlig virksomhet</i>	<i>Industri med eldrevne prosesser</i>
Januar	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Februar	1,10	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Mars	1,10	0,90	0,87	1,00	0,67	1,00
April	1,10	0,90	0,87	1,00	0,67	1,00
Mai	0,90	0,90	0,87	1,00	0,67	1,00
Juni	0,90	0,80	0,86	1,02	0,51	1,00
Juli	0,90	0,80	0,86	1,02	0,51	1,00
August	0,90	0,80	0,86	1,02	0,51	1,00
September	1,00	1,00	0,88	1,06	0,58	1,00
Oktober	1,00	1,00	0,88	1,06	0,58	1,00
November	1,10	1,00	0,88	1,06	0,58	1,00
Desember	1,10	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
<i>Ukedag</i>	<i>Jordbruk</i>	<i>Husholdning</i>	<i>Industri</i>	<i>Handel og tjenester</i>	<i>Offentlig virksomhet</i>	<i>Industri med eldrevne prosesser</i>
Hverdag	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Lørdag	1,10	1,10	0,13	0,45	0,30	1,00
Søndag	1,10	1,10	0,14	0,11	0,29	1,00
<i>Klokkeslett</i>	<i>Jordbruk</i>	<i>Husholdning</i>	<i>Industri</i>	<i>Handel og tjenester</i>	<i>Offentlig virksomhet</i>	<i>Industri med eldrevne prosesser</i>
0000–0600	0,80	0,90	0,12	0,11	0,43	1,00
0600–0800	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
0800–1200	0,90	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
1200–1600	0,70	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
1600–1800	1,00	1,10	1,00	1,00	1,00	1,00
1800–2000	1,00	1,10	0,14	0,30	0,31	1,00
2000–2400	0,80	1,10	0,14	0,29	0,31	1,00

**Figur A1:** Korreksjonsfaktorer for korrigerings av referansetidspunkt

---

## Vedlegg B: Eksempel på seksjoneringsforløp i luftnett-modell

Følgende illustrasjoner beskriver seksjoneringsforløp for de ulike seksjoneringsmetodikkene i luftnett-modell gitt feil på kraftlinje ( $L_E$ ).

### Halveringsprinsippet - halvering av antall nettstasjoner

Figur B2 illustrerer seksjoneringsforløpet for *halvering av antall nettstasjoner* med sekundærkriteriet *nærmeste nettstasjon*, mens figur B3 *sannsynlighet for innkobling mot varig feil*.

Primærfeil på linje ( $L_E$ )	
Effektbryter (K1) løser ut	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8, P9, P10, P11, P12]
GIK av (K1)	Avbrudd = []
Effektbryter (K1) løser ut	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8, P9, P10, P11, P12]
Responstid	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8, P9, P10, P11, P12]
Utrykningstid	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8, P9, P10, P11, P12]
Lastbryter (LS3) åpnes	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8, P9, P10, P11, P12]
Effektbryter (K1) lukkes	Avbrudd = [P7, P8, P9, P10, P11, P12]
Effektbryter (K1) løser ut	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8, P9, P10, P11, P12]
Reservemating (LS6) lukkes	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4, P5, P6]
Reisetid til lastbryter (LS2)	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4, P5, P6]
Lastbryter (LS2) åpnes	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4, P5, P6]
Effektbryter (K1) lukkes	Avbrudd = [P5, P6]
Effektbryter (K1) løser ut	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4, P5, P6]
Reisetid til lastbryter (LS3)	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4, P5, P6]
Lastbryter (LS3) lukkes	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4]
Reisetid til lastbryter (LS1)	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4]
Lastbryter (LS1) åpnes	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4]
Effektbryter (K1) lukkes	Avbrudd = [P3, P4]
Befaring av kraftlinje	Avbrudd = [P3, P4]
Reparasjon av linje ( $L_E$ )	Avbrudd = [P3, P4]
Lastbryter (LS1) lukkes	Avbrudd = []

**Figur B2:** Seksjoneringsforløp for *halvering av antall nettstasjoner* med sekundærkriteriet *nærmeste nettstasjon* i luftnett

Primærfeil på linje ( $L_E$ )	
Effektbryter (K1) løser ut	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8, P9, P10, P11, P12]
GIK av (K1)	Avbrudd = []
Effektbryter (K1) løser ut	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8, P9, P10, P11, P12]
Responstid	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8, P9, P10, P11, P12]
Utrykningstid	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8, P9, P10, P11, P12]
Lastbryter (LS3) åpnes	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8, P9, P10, P11, P12]
Effektbryter (K1) lukkes	Avbrudd = [P7, P8, P9, P10, P11, P12]
Effektbryter (K1) løser ut	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8, P9, P10, P11, P12]
Reservemating (LS6) lukkes	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4, P5, P6]
Reisetid til lastbryter (LS1)	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4, P5, P6]
Lastbryter (LS1) åpnes	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4, P5, P6]
Effektbryter (K1) lukkes	Avbrudd = [P3, P4, P5, P6]
Effektbryter (K1) åpnes	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4, P5, P6]
Lastbryter (LS1) lukkes	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4, P5, P6]
Reisetid til lastbryter (LS2)	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4, P5, P6]
Lastbryter (LS2) åpnes	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4, P5, P6]
Effektbryter (K1) lukkes	Avbrudd = [P5, P6]
Effektbryter (K1) løser ut	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4, P5, P6]
Reisetid til lastbryter (LS3)	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4, P5, P6]
Lastbryter (LS3) lukkes	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4]
Reisetid til lastbryter (LS1)	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4]
Lastbryter (LS1) åpnes	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4]
Effektbryter (K1) lukkes	Avbrudd = [P3, P4]
Befaring av kraftlinje	Avbrudd = [P3, P4]
Reparasjon av linje ( $L_E$ )	Avbrudd = [P3, P4]
Lastbryter (LS1) lukkes	Avbrudd = []

**Figur B3:** Seksjoneringsforløp for *halvering av antall nettstasjoner* med sekundærkriteriet *sannsynlighet for innkobling mot varig feil* i luftnett

---

## Halveringsprinsippet - halvering av lengde på radial

Figur B4 illustrerer seksjoneringsforløpet for seksjoneringsmetodikken *halvering av lengde på radial* gitt feil på kraftlinje ( $L_E$ ) i luftnett-modellen.

Primærfeil på linje ( $L_E$ )	
Effektbryter (K1) løser ut	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8, P9, P10, P11, P12]
GIK av (K1)	Avbrudd = []
Effektbryter (K1) løser ut	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8, P9, P10, P11, P12]
Responstid	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8, P9, P10, P11, P12]
Utrykningstid	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8, P9, P10, P11, P12]
Lastbryter (LS4) åpnes	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8, P9, P10, P11, P12]
Effektbryter (K1) lukkes	Avbrudd = [P9, P10, P11, P12]
Effektbryter (K1) løser ut	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8, P9, P10, P11, P12]
Reservemating (LS6) lukkes	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8]
Reisetid til lastbryter (LS3)	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8]
Lastbryter (LS3) åpnes	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8]
Effektbryter (K1) lukkes	Avbrudd = [P7, P8]
Effektbryter (K1) løser ut	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8]
Reisetid til lastbryter (LS4)	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8]
Lastbryter (LS4) lukkes	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4, P5, P6]
Reisetid til lastbryter (LS2)	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4, P5, P6]
Lastbryter (LS2) åpnes	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4, P5, P6]
Effektbryter (K1) lukkes	Avbrudd = [P5, P6]
Effektbryter (K1) løser ut	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4, P5, P6]
Reisetid til lastbryter (LS3)	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4, P5, P6]
Lastbryter (LS3) lukkes	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4]
Reisetid til lastbryter (LS1)	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4]
Lastbryter (LS1) åpnes	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4]
Effektbryter (K1) lukkes	Avbrudd = [P3, P4]
Befaring av kraftlinjer	Avbrudd = [P3, P4]
Reparasjon av linje ( $L_E$ )	Avbrudd = [P3, P4]
Lastbryter (LS1) lukkes	Avbrudd = []

Figur B4: Seksjoneringsforløp for *halvering av lengde på radial* i luftnett

## Halveringsprinsippet - halvering av KILE-satser

Figur B5 illustrerer seksjoneringsforløpet for seksjoneringsmetodikken *halvering av KILE-satser* gitt feil på kraftlinje ( $L_E$ ) i luftnett-modellen.

Primærfeil på linje ( $L_E$ )	
Effektbryter (K1) løser ut	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8, P9, P10, P11, P12]
GIK av (K1)	Avbrudd = []
Effektbryter (K1) løser ut	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8, P9, P10, P11, P12]
Responstid	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8, P9, P10, P11, P12]
Utrykningstid	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8, P9, P10, P11, P12]
Lastbryter (LS2) åpnes	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8, P9, P10, P11, P12]
Effektbryter (K1) lukkes	Avbrudd = [P5, P6, P7, P8, P9, P10, P11, P12]
Effektbryter (K1) løser ut	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8, P9, P10, P11, P12]
Reservemating (LS6) lukkes	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4]
Reisetid til lastbryter (LS1)	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4]
Lastbryter (LS1) åpnes	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4]
Effektbryter (K1) lukkes	Avbrudd = [P3, P4]
Befaring av kraftlinje	Avbrudd = [P3, P4]
Reparasjon av linje ( $L_E$ )	Avbrudd = [P3, P4]
Lastbryter (LS1) lukkes	Avbrudd = []

Figur B5: Seksjoneringsforløp for *halvering av KILE-satser* i luftnett



---

## Sekvensiell seksjonering

Figur B6 illustrerer seksjoneringsforløpet for seksjoneringsmetodikken *sekvensiell seksjonering* gitt feil på kraftlinje ( $L_E$ ) i luftnett-modellen.

Primærfeil på linje ( $L_E$ )	
Effektbryter (K1) løser ut GIK av (K1)	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8, P9, P10, P11, P12]
Effektbryter (K1) løser ut Responstid	Avbrudd = []
Utrykningstid	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8, P9, P10, P11, P12]
Lastbryter (LS1) åpnes	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8, P9, P10, P11, P12]
Effektbryter (K1) lukkes	Avbrudd = [P3, P4, P5, P6, P7, P8, P9, P10, P11, P12]
Effektbryter (K1) åpnes	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8, P9, P10, P11, P12]
Lastbryter (LS1) lukkes	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8, P9, P10, P11, P12]
Reisetid til lastbryter (LS2)	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8, P9, P10, P11, P12]
Lastbryter (LS2) åpnes	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8, P9, P10, P11, P12]
Effektbryter (K1) lukkes	Avbrudd = [P5, P6, P7, P8, P9, P10, P11, P12]
Effektbryter (K1) løser ut	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8, P9, P10, P11, P12]
Reservemating (LS6) lukkes	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4]
Reisetid til lastbryter (LS1)	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4]
Lastbryter (LS1) åpnes	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4]
Effektbryter (K1) lukkes	Avbrudd = [P3, P4]
Befaring av kraftlinje	Avbrudd = [P3, P4]
Reparasjon av linje ( $L_E$ )	Avbrudd = [P3, P4]
Lastbryter (LS1) lukkes	Avbrudd = []

**Figur B6:** Seksjoneringsforløp for *sekvensiell seksjonering* i luftnett

---

## Vedlegg C: Eksempel på seksjoneringsforløp i kabelnett-modell

Følgende illustrasjoner beskriver seksjoneringsforløp for de ulike seksjoneringsmetodikkene i kabelnett-modell gitt feil på kraftlinje ( $L_B$ ). Siden både prøvekoblinger og isolasjonsmålinger praktiseres på kabelnett er begge seksjoneringsmetodene for alle de ulike metodikkene illustrert.

### Halveringsprinsippet - halvering av antall nettstasjoner

#### Prøvekobling:

Figur C7 viser seksjoneringsforløpet for *halvering av antall nettstasjoner* med sekundærkriteriet *nærmeste nettstasjon*, mens figur C8 med sekundærkriteriet *sannsynlighet for innkobling mot varig feil*. Nettet seksjoneres i begge tilfeller ved hjelp av prøvekoblinger.

Primærfeil på kabelstrekning ( $L_B$ )	
Effektbryter (K1) løser ut	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4, P5]
Responstid	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4, P5]
Utrykningstid	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4, P5]
Lastbryter (LS6) åpnes	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4, P5]
Effektbryter (K1) lukkes	Avbrudd = [P4, P5]
Effektbryter (K1) løser ut	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4, P5]
Reservemating (LS11) lukkes	Avbrudd = [P1, P2, P3]
Montør inspiserer NS3	Avbrudd = [P1, P2, P3]
Lastbryter (LS5) åpnes	Avbrudd = [P1, P2, P3]
Lastbryter (LS6) lukkes	Avbrudd = [P1, P2]
Reisetid til NS2	Avbrudd = [P1, P2]
Lastbryter (LS3) åpnes	Avbrudd = [P1, P2]
Effektbryter (K1) lukkes	Avbrudd = []
Effektbryter (K1) løser ut	Avbrudd = [P1, P2]
Reisetid til NS3	Avbrudd = [P1, P2]
Lastbryter (LS5) lukkes	Avbrudd = [P1]
Reisetid til NS1	Avbrudd = [P1]
Lastbryter (LS2) åpnes	Avbrudd = [P1]
Effektbryter (K1) lukkes	Avbrudd = []
Reparasjon av kabel ( $L_B$ )	Avbrudd = []

**Figur C7:** Seksjoneringsforløp ved bruk av prøvekoblinger for *halvering av antall nettstasjoner* med sekundærkriteriet *nærmeste nettstasjon* i kabelnett

Primærfeil på kabelstrekning ( $L_B$ )	
Effektbryter (K1) løser ut	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4, P5]
Responstid	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4, P5]
Utrykningstid	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4, P5]
Lastbryter (LS6) åpnes	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4, P5]
Effektbryter (K1) lukkes	Avbrudd = [P4, P5]
Effektbryter (K1) løser ut	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4, P5]
Reservemating (LS11) lukkes	Avbrudd = [P1, P2, P3]
Montør inspiserer NS3	Avbrudd = [P1, P2, P3]
Lastbryter (LS5) åpnes	Avbrudd = [P1, P2, P3]
Lastbryter (LS6) lukkes	Avbrudd = [P1, P2]
Reisetid til NS1	Avbrudd = [P1, P2]
Lastbryter (LS2) åpnes	Avbrudd = [P1, P2]
Effektbryter (K1) lukkes	Avbrudd = [P2]
Effektbryter (K1) åpnes	Avbrudd = [P1, P2]
Reisetid til NS2	Avbrudd = [P1, P2]
Lastbryter (LS4) åpnes	Avbrudd = [P1, P2]
Effektbryter (K1) lukkes	Avbrudd = []
Effektbryter (K1) løser ut	Avbrudd = [P1, P2]
Montør inspiserer NS2	Avbrudd = [P1, P2]
Lastbryter (LS3) åpnes	Avbrudd = [P1, P2]
Lastbryter (LS4) lukkes	Avbrudd = [P1, P2]
Reisetid til NS3	Avbrudd = [P1, P2]
Lastbryter (LS5) lukkes	Avbrudd = [P1]
Reisetid til NS1	Avbrudd = [P1, P2]
Lastbryter (LS2) åpnes	Avbrudd = [P1, P2]
Effektbryter (K1) lukkes	Avbrudd = []
Reparasjon av kabel ( $L_B$ )	Avbrudd = []

**Figur C8:** Seksjoneringsforløp ved bruk av prøvekoblinger for *halvering av antall nettstasjoner* med sekundærkriteriet *sannsynlighet for innkobling mot varig feil* i kabelnett

---

## Isolasjonsmåling:

Figur C9 viser seksjoneringsforløpet for *halvering av antall nettstasjoner* med sekundærkriteriet *nærmeste nettstasjon*, mens figur C10 med sekundærkriteriet “sannsynlighet for innkobling mot varig feil”. Nettet seksjonerer i begge tilfeller ved hjelp av isolasjonsmålinger.

Primærfeil på kabelstrekning (L <sub>B</sub> )	
Effektbryter (K1) løser ut	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4, P5]
Responstid	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4, P5]
Utrykningstid	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4, P5]
Lastbryter (LS6) åpnes	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4, P5]
Megger tilkobles (LS6)	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4, P5]
Lastbryter (LS5) åpnes	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4, P5]
Lastbryter (LS6) lukkes	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4, P5]
Megger frakobles (LS6)	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4, P5]
Reservemating (LS11) lukkes	Avbrudd = [P1, P2]
Reisetid til NS2	Avbrudd = [P1, P2]
Lastbryter (LS3) åpnes	Avbrudd = [P1, P2]
Megger tilkobles (LS4)	Avbrudd = [P1, P2]
Megger frakobles (LS4)	Avbrudd = [P1, P2]
Reisetid til NS3	Avbrudd = [P1, P2]
Lastbryter (LS5) lukkes	Avbrudd = [P1]
Reisetid til NS1	Avbrudd = [P1]
Lastbryter (LS2) åpnes	Avbrudd = [P1]
Megger tilkobles (LS2)	Avbrudd = [P1]
Megger frakobles (LS2)	Avbrudd = [P1]
Effektbryter (K1) lukkes	Avbrudd = []
Reparasjon av kabel (L <sub>B</sub> )	Avbrudd = []

**Figur C9:** Seksjoneringsforløp ved megging for *halvering av antall nettstasjoner* med sekundærkriteriet *nærmeste nettstasjon* i kabelnett

Primærfeil på kabelstrekning (L <sub>B</sub> )	
Effektbryter (K1) løser ut	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4, P5]
Responstid	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4, P5]
Utrykningstid	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4, P5]
Lastbryter (LS6) åpnes	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4, P5]
Megger tilkobles (LS6)	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4, P5]
Lastbryter (LS5) åpnes	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4, P5]
Lastbryter (LS6) lukkes	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4, P5]
Megger frakobles (LS6)	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4, P5]
Reservemating (LS11) lukkes	Avbrudd = [P1, P2]
Reisetid til NS1	Avbrudd = [P1, P2]
Lastbryter (LS2) åpnes	Avbrudd = [P1, P2]
Megger tilkobles (LS2)	Avbrudd = [P1, P2]
Megger frakobles (LS2)	Avbrudd = [P1, P2]
Effektbryter (K1) lukkes	Avbrudd = [P2]
Reisetid til NS2	Avbrudd = [P2]
Lastbryter (LS4) åpnes	Avbrudd = [P2]
Megger tilkobles (LS4)	Avbrudd = [P2]
Lastbryter (LS3) åpnes	Avbrudd = [P2]
Lastbryter (LS4) lukkes	Avbrudd = [P2]
Megger frakobles (LS4)	Avbrudd = [P2]
Reisetid til NS3	Avbrudd = [P2]
Lastbryter (LS5) lukkes	Avbrudd = []
Reparasjon av kabel (L <sub>B</sub> )	Avbrudd = []

**Figur C10:** Seksjoneringsforløp ved megging for *halvering av antall nettstasjoner* med sekundærkriteriet *sannsynlighet for innkobling mot varig feil* i kabelnett

---

## Halveringsprinsippet - halvering av lengde på radial

### Prøvekobling:

Figur C11 viser seksjoneringsforløpet for *halvering av lengde av radial*, hvor prøvekoblinger praktiseres.

Primærfeil på kabelstrekning (L <sub>B</sub> )	
Effektbryter (K1) løser ut	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4, P5]
Responstid	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4, P5]
Utrykningstid	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4, P5]
Lastbryter (LS4) åpnes	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4, P5]
Effektbryter (K1) lukkes	Avbrudd = [P3, P4, P5]
Effektbryter (K1) løser ut	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4, P5]
Reservemating (LS11) lukkes	Avbrudd = [P1, P2]
Montør inspiserer NS2	Avbrudd = [P1, P2]
Lastbryter (LS3) åpnes	Avbrudd = [P1, P2]
Lastbryter (LS4) lukkes	Avbrudd = [P1]
Reisetid til NS1	Avbrudd = [P1]
Lastbryter (LS2) åpnes	Avbrudd = [P1]
Effektbryter (K1) lukkes	Avbrudd = []
Reparasjon av kabel (L <sub>B</sub> )	Avbrudd = []

**Figur C11:** Seksjoneringsforløp ved bruk av prøvekoblinger for *halvering av lengde på radial* i kabelnett

### Isolasjonsmåling:

Figur C12 viser seksjoneringsforløpet for *halvering av lengde av radial*, hvor isolasjonsmålinger praktiseres.

Primærfeil på kabelstrekning (L <sub>B</sub> )	
Effektbryter (K1) løser ut	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4, P5]
Responstid	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4, P5]
Utrykningstid	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4, P5]
Lastbryter (LS4) åpnes	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4, P5]
Megger tilkobles (LS4)	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4, P5]
Lastbryter (LS3) åpnes	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4, P5]
Lastbryter (LS4) lukkes	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4, P5]
Megger frakobles (LS4)	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4, P5]
Reservemating (LS11) lukkes	Avbrudd = [P1]
Reisetid til NS1	Avbrudd = [P1]
Lastbryter (LS2) åpnes	Avbrudd = [P1]
Megger tilkobles (LS2)	Avbrudd = [P1]
Megger frakobles (LS2)	Avbrudd = [P1]
Effektbryter (K1) lukkes	Avbrudd = []
Reparasjon av kabel (L <sub>B</sub> )	Avbrudd = []

**Figur C12:** Seksjoneringsforløp ved megging for *halvering av lengde på radial* i kabelnett

---

## Halveringsprinsippet - halvering av forventet KILE

### Prøvekobling:

Figur C13 viser seksjoneringsforløpet ved bruk av metodikken *halvering av forventet KILE*. Prøvekoblinger benyttes som seksjoneringsmetode.

Primærfeil på kabelstrekning (L <sub>B</sub> )	
Effektbryter (K1) løser ut	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4, P5]
Responstid	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4, P5]
Utrykningstid	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4, P5]
Lastbryter (LS5) åpnes	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4, P5]
Effektbryter (K1) lukkes	Avbrudd = [P3, P4, P5]
Effektbryter (K1) løser ut	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4, P5]
Reservemating (LS11) lukkes	Avbrudd = [P1, P2]
Reisetid til NS2	Avbrudd = [P1, P2]
Lastbryter (LS3) åpnes	Avbrudd = [P1, P2]
Effektbryter (K1) lukkes	Avbrudd = [P2]
Effektbryter (K1) løser ut	Avbrudd = [P1, P2]
Reisetid til NS3	Avbrudd = [P1, P2]
Lastbryter (LS5) lukkes	Avbrudd = [P1]
Reisetid til NS1	Avbrudd = [P1]
Lastbryter (LS1) åpnes	Avbrudd = [P1]
Effektbryter (K1) lukkes	Avbrudd = [P1]
Lastbryter (LS2) åpnes	Avbrudd = [P1]
Lastbryter (L1) lukkes	Avbrudd = []
Reparasjon av linje (L <sub>B</sub> )	Avbrudd = []

**Figur C13:** Seksjoneringsforløp ved bruk av prøvekoblinger for *halvering av forventet KILE* i kabelnett

### Isolasjonsmåling:

Figur C14 viser seksjoneringsforløpet ved bruk av metodikken *halvering av forventet KILE*. Isolasjonsmålinger benyttes som seksjoneringsmetode.

Primærfeil på kabelstrekning (L <sub>B</sub> )	
Effektbryter (K1) løser ut	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4, P5]
Responstid	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4, P5]
Utrykningstid	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4, P5]
Lastbryter (LS5) åpnes	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4, P5]
Megger tilkobles (LS6)	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4, P5]
Megger frakobles (LS6)	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4, P5]
Reservemating (LS11) lukkes	Avbrudd = [P1, P2]
Reisetid til NS2	Avbrudd = [P1, P2]
Lastbryter (LS3) åpnes	Avbrudd = [P1, P2]
Megger tilkobles (LS4)	Avbrudd = [P1, P2]
Megger frakobles (LS4)	Avbrudd = [P1, P2]
Reisetid til NS3	Avbrudd = [P1, P2]
Lastbryter (LS5) lukkes	Avbrudd = [P1]
Reisetid til NS1	Avbrudd = [P1]
Lastbryter (LS1) åpnes	Avbrudd = [P1]
Megger tilkobles (LS2)	Avbrudd = [P1]
Lastbryter (LS2) åpnes	Avbrudd = [P1]
Megger frakobles (LS2)	Avbrudd = [P1]
Lastbryter (LS1) lukkes	Avbrudd = [P1]
Effektbryter (K1) lukkes	Avbrudd = []
Reparasjon av kabel (L <sub>B</sub> )	Avbrudd = []

**Figur C14:** Seksjoneringsforløp ved megging for *halvering av forventet KILE* i kabelnett

---

## Sekvensiell seksjonering

### Prøvekobling:

Figur C15 viser seksjoneringsforløpet ved bruk av *sekvensiell seksjonering* med prøvekoblinger som seksjoneringsmetode.

Primærfeil på kabelstrekning (L <sub>B</sub> )	
Effektbryter (K1) løser ut	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4, P5]
Responstid	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4, P5]
Utrykningstid	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4, P5]
Lastbryter (LS2) åpnes	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4, P5]
Effektbryter (K1) lukkes	Avbrudd = [P2, P3, P4, P5]
Effektbryter (K1) åpnes	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4, P5]
Reisetid til NS2	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4, P5]
Lastbryter (LS4) åpnes	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4, P5]
Effektbryter (K1) lukkes	Avbrudd = [P3, P4, P5, P6]
Effektbryter (K1) løser ut	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4, P5]
Reservemating (LS11) lukkes	Avbrudd = [P1, P2]
Montør inspiserer NS2	Avbrudd = [P1, P2]
Lastbryter (LS3) åpnes	Avbrudd = [P1, P2]
Lastbryter (LS4) lukkes	Avbrudd = [P1]
Reisetid til NS1	Avbrudd = [P1]
Lastbryter (LS2) åpnes	Avbrudd = [P1]
Effektbryter (K1) lukkes	Avbrudd = []
Reparasjon av kabel (L <sub>B</sub> )	Avbrudd = []

**Figur C15:** Seksjoneringsforløp ved bruk av prøvekoblinger for *sekvensiell seksjonering* i kabelnett

### Isolasjonsmåling:

Figur C16 viser seksjoneringsforløpet ved bruk av *sekvensiell seksjonering* med isolasjonsmålinger som seksjoneringsmetode.

Primærfeil på kabelstrekning (L <sub>B</sub> )	
Effektbryter (K1) løser ut	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4, P5]
Responstid	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4, P5]
Utrykningstid	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4, P5]
Lastbryter (LS2) åpnes	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4, P5]
Megger tilkobles (LS2)	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4, P5]
Megger frakobles (LS2)	Avbrudd = [P1, P2, P3, P4, P5]
Effektbryter (K1) lukkes	Avbrudd = [P2, P3, P4, P5]
Reisetid til NS2	Avbrudd = [P2, P3, P4, P5]
Lastbryter (LS4) åpnes	Avbrudd = [P2, P3, P4, P5]
Megger tilkobles (LS4)	Avbrudd = [P2, P3, P4, P5]
Lastbryter (LS3) åpnes	Avbrudd = [P2, P3, P4, P5]
Lastbryter (LS4) lukkes	Avbrudd = [P2, P3, P4, P5]
Megger frakobles (LS4)	Avbrudd = [P2, P3, P4, P5]
Reservemating (LS11) lukkes	Avbrudd = []
Reparasjon av kabel (L <sub>B</sub> )	Avbrudd = []

**Figur C16:** Seksjoneringsforløp ved megging for *sekvensiell seksjonering* i kabelnett

---

## Vedlegg D: Resultater fra luftnett-modell

I følgende vedlegg blir alle resultater av pålitelighetsanalyser for de ulike seksjoneringsmetodikkene i luftnett-modellen presentert. I kapittel 9 er fremgangsmåten for beregning av resultatene detaljert beskrevet.

### D.1: Halveringsprinsippet - halvering av antall nettstasjoner

#### D. 1.1: Sekundærkriterie - Nærmeste nettstasjon

Følgende resultater gjelder for seksjoneringsmetodikken *halvering av antall nettstasjoner* med sekundærkriteriet *nærmeste nettstasjon*. Sekundærkriteriet går ut på velge bryteren nærmest forrige seksjoneringspunkt dersom det oppstår tilfeller hvor to brytere tilfredsstillt krav om halvering av antall nettstasjoner. Ved valg av første seksjoneringspunkt velges nettstasjonen nærmest trafostasjonen. Tabell D1 viser gjennomsnittlig avbruddsvarigheter for hver seksjon gitt feilende komponent.

Feilende Komp.	Gjennomsnittlig avbruddsvarighet ( $r$ ) for seksjoner [timer]					
	Seksjon 1	Seksjon 2	Seksjon 3	Seksjon 4	Seksjon 5	Seksjon 6
$L_A$	4.243	1.012	0.675	0.392	0.392	0.392
$L_B$	4.529	1.012	0.675	0.392	0.392	0.392
$L_C$	4.017	1.012	0.675	0.392	0.392	0.392
$L_D$	0.885	3.704	0.675	0.392	0.392	0.392
$L_E$	0.885	4.275	0.675	0.392	0.392	0.392
$L_F$	0.885	4.275	0.675	0.392	0.392	0.392
$L_G$	0.533	0.533	3.424	0.392	0.392	0.392
$L_H$	0.533	0.533	4.138	0.392	0.392	0.392
$L_I$	0.533	0.533	4.138	0.392	0.392	0.392
$L_J$	0.785	0.785	0.785	3.818	0.613	0.613
$L_K$	0.785	0.785	0.785	4.818	0.613	0.613
$L_L$	0.785	0.785	0.785	4.818	0.613	0.613
$L_M$	1.037	1.037	1.037	1.037	4.141	0.850
$L_N$	1.037	1.037	1.037	1.037	5.284	0.850
$L_O$	1.037	1.037	1.037	1.037	5.284	0.850
$L_P$	0.842	0.842	0.842	0.842	0.842	3.707
$L_Q$	0.842	0.842	0.842	0.842	0.842	4.421
$L_R$	0.842	0.842	0.842	0.842	0.842	5.136
Totalt	25.03	24.88	23.74	22.62	22.60	21.18

Tabell D1: Gjennomsnittlig avbruddsvarighet ( $r$ ) i seksjoner

Tabell D2 viser årlig forventet avbruddsvarighet i hver seksjon for gitt seksjoneringsmetodikk. Her er feilsannsynligheten til kraftlinjene benyttet til å beregne en forventningsverdi for avbruddsvarighet.

Seksjoner Varighet	Årlig forventet avbruddsvarighet i seksjoner [timer/år]					
	Seksjon 1	Seksjon 2	Seksjon 3	Seksjon 4	Seksjon 5	Seksjon 6
	1.028	1.203	1.273	1.458	1.565	1.659

Tabell D2: Årlig forventet avbruddsvarighet i seksjoner

Kraftlinjer, brytere, fordelingstrafoer og sikringer i de ulike seksjonene vil bli berørt av store feilstrømmer ved innkobling mot varig feil. Ut i fra seksjoneringsforløpene er antall innkoblinger mot feil for hver seksjon gitt feilende komponent registrert, se tabell D3.

Feilende Komp.	Antall innkoblinger mot feil for seksjoner [-]					
	Seksjon 1	Seksjon 2	Seksjon 3	Seksjon 4	Seksjon 5	Seksjon 6
<i>L<sub>A</sub></i>	3	2	1	0	0	0
<i>L<sub>B</sub></i>	3	2	1	0	0	0
<i>L<sub>C</sub></i>	3	2	1	0	0	0
<i>L<sub>D</sub></i>	2	2	1	0	0	0
<i>L<sub>E</sub></i>	2	2	1	0	0	0
<i>L<sub>F</sub></i>	2	2	1	0	0	0
<i>L<sub>G</sub></i>	1	1	1	0	0	0
<i>L<sub>H</sub></i>	1	1	1	0	0	0
<i>L<sub>I</sub></i>	1	1	1	0	0	0
<i>L<sub>J</sub></i>	1	1	1	1	0	0
<i>L<sub>K</sub></i>	1	1	1	1	0	0
<i>L<sub>L</sub></i>	1	1	1	1	0	0
<i>L<sub>M</sub></i>	1	1	1	1	1	0
<i>L<sub>N</sub></i>	1	1	1	1	1	0
<i>L<sub>O</sub></i>	1	1	1	1	1	0
<i>L<sub>P</sub></i>	0	0	0	0	0	0
<i>L<sub>Q</sub></i>	0	0	0	0	0	0
<i>L<sub>R</sub></i>	0	0	0	0	0	0
Totalt	24	21	15	6	3	0

**Tabell D3:** Antall innkoblinger mot feil i seksjoner

Siden sannsynlighet for at feil varierer langs radialen er forventningsverdier for antall innkobling mot varig feil for hver seksjon beregnet, se tabell D4.

Seksjoner	Årlig forventet antall innkobling mot varig feil [antall/år]					
	Seksjon 1	Seksjon 2	Seksjon 3	Seksjon 4	Seksjon 5	Seksjon 6
Antall	0.946	0.890	0.723	0.417	0.223	0.00

**Tabell D4:** Årlig antall forventede innkoblinger mot feil i seksjoner



Tabell D5 viser de forventede KILE-kostnadene for hvert lastpunkt gitt feilende komponent.

Feilende Komp.	Forventet KILE-kostnader for lastpunkter [NOK]											
	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$	$P_5$	$P_6$	$P_7$	$P_8$	$P_9$	$P_{10}$	$P_{11}$	$P_{12}$
$L_A$	458	458	126	126	74	74	39	39	28	28	18	18
$L_B$	486	486	126	126	74	74	39	39	28	28	18	18
$L_C$	436	436	126	126	74	74	39	39	28	28	18	18
$L_D$	279	279	699	699	147	147	79	79	56	56	35	35
$L_E$	279	279	790	790	147	147	79	79	56	56	35	35
$L_F$	279	279	790	790	147	147	79	79	56	56	35	35
$L_G$	241	241	200	200	679	679	99	99	70	70	44	44
$L_H$	241	241	200	200	803	803	99	99	70	70	44	44
$L_I$	241	241	200	200	803	803	99	99	70	70	44	44
$L_J$	446	446	366	366	286	286	828	828	131	131	89	89
$L_K$	446	446	366	366	286	286	1005	1005	131	131	89	89
$L_L$	446	446	366	366	286	286	1005	1005	131	131	89	89
$L_M$	627	627	512	512	397	397	303	303	785	785	135	135
$L_N$	627	627	512	512	397	397	303	303	983	983	135	135
$L_O$	627	627	512	512	397	397	303	303	983	983	135	135
$L_P$	672	672	550	550	429	429	325	325	236	236	672	672
$L_Q$	672	672	550	550	429	429	325	325	236	236	797	797
$L_R$	672	672	550	550	429	429	325	325	236	236	923	923
<b>Totalt</b>	8175	8175	7541	7541	6284	6284	5373	5373	4314	4314	3355	3355

**Tabell D5:** Forventede KILE-kostnader

Tabell D6 viser en oppsummering av ulike pålitelighetsindekser for gitt seksjoneringsmetodikk.

Pålitelighetsindekser	
$P_{Avbrutt}$ [kW/år]	1202.0
ILE [kWh/år]	1637.2
SAIDI [min/år]	81.8617
ASAI [-]	0.999844
KILE [NOK/år]	70084 ,-

**Tabell D6:** Pålitelighetsindekser for gitt seksjoneringsmetodikk

### D. 1.2: Sekundærkriterie - Sannsynlighet for innkobling mot varig feil

Følgende resultater gjelder for sekundærkriteriet *sannsynlighet for innkobling mot varig feil*. Sekundærkriteriet går ut på velge bryteren som gir lavest sannsynlighet for innkobling mot varig feil dersom det oppstår tilfeller hvor to brytere tilfredsstiller krav om halvering av antall nettstasjoner. Ved valg av første seksjoneringspunkt velges nettstasjonen nærmest trafostasjonen. Tabell D7 viser gjennomsnittlig avbruddsvarigheter for hver seksjon gitt feilende komponent.

Feilende Komp.	Gjennomsnittlig avbruddsvarighet ( $r$ ) for seksjoner [timer]					
	Seksjon 1	Seksjon 2	Seksjon 3	Seksjon 4	Seksjon 5	Seksjon 6
$L_A$	4.101	0.795	0.795	0.392	0.392	0.392
$L_B$	4.387	0.795	0.795	0.392	0.392	0.392
$L_C$	3.876	0.795	0.795	0.392	0.392	0.392
$L_D$	1.122	3.941	0.912	0.392	0.392	0.392
$L_E$	1.122	4.512	0.912	0.392	0.392	0.392
$L_F$	1.122	4.512	0.912	0.392	0.392	0.392
$L_G$	0.770	0.770	3.660	0.392	0.392	0.392
$L_H$	0.770	0.770	4.375	0.392	0.392	0.392
$L_I$	0.770	0.770	4.375	0.392	0.392	0.392
$L_J$	0.785	0.785	0.785	3.818	0.613	0.613
$L_K$	0.785	0.785	0.785	4.818	0.613	0.613
$L_L$	0.785	0.785	0.785	4.818	0.613	0.613
$L_M$	1.037	1.037	1.037	1.037	4.141	0.850
$L_N$	1.037	1.037	1.037	1.037	5.284	0.850
$L_O$	1.037	1.037	1.037	1.037	5.284	0.850
$L_P$	0.842	0.842	0.842	0.842	0.842	3.707
$L_Q$	0.842	0.842	0.842	0.842	0.842	4.421
$L_R$	0.842	0.842	0.842	0.842	0.842	5.136
Totalt	26.03	25.65	25.52	22.62	22.60	21.18

Tabell D7: Gjennomsnittlig avbruddsvarighet ( $r$ ) i seksjoner

Tabell D8 viser årlig forventet avbruddsvarighet i hver seksjon for gitt seksjoneringsmetodikk. Her er feilsannsynligheten til kraftlinjene benyttet til å beregne en forventningsverdi for avbruddsvarighet.

Seksjoner Varighet	Årlig forventet avbruddsvarighet i seksjoner [timer/år]					
	Seksjon 1	Seksjon 2	Seksjon 3	Seksjon 4	Seksjon 5	Seksjon 6
	1.079	1.250	1.339	1.458	1.565	1.659

Tabell D8: Årlig forventet avbruddsvarighet i seksjoner

Kraftlinjer, brytere, fordelingstrafoer og sikringer i de ulike seksjonene vil bli berørt av store feilstrømmer ved innkobling mot varig feil. Ut i fra seksjoneringsforløpene er antall innkoblinger mot feil for hver seksjon gitt feilende komponent registrert, se tabell D9.

Feilende Komp.	Antall innkoblinger mot feil i seksjoner [-]					
	Seksjon 1	Seksjon 2	Seksjon 3	Seksjon 4	Seksjon 5	Seksjon 6
<i>L<sub>A</sub></i>	2	1	1	0	0	0
<i>L<sub>B</sub></i>	2	1	1	0	0	0
<i>L<sub>C</sub></i>	2	1	1	0	0	0
<i>L<sub>D</sub></i>	2	2	1	0	0	0
<i>L<sub>E</sub></i>	2	2	1	0	0	0
<i>L<sub>F</sub></i>	2	2	1	0	0	0
<i>L<sub>G</sub></i>	1	1	1	0	0	0
<i>L<sub>H</sub></i>	1	1	1	0	0	0
<i>L<sub>I</sub></i>	1	1	1	0	0	0
<i>L<sub>J</sub></i>	1	1	1	1	0	0
<i>L<sub>K</sub></i>	1	1	1	1	0	0
<i>L<sub>L</sub></i>	1	1	1	1	0	0
<i>L<sub>M</sub></i>	1	1	1	1	1	0
<i>L<sub>N</sub></i>	1	1	1	1	1	0
<i>L<sub>O</sub></i>	1	1	1	1	1	0
<i>L<sub>P</sub></i>	0	0	0	0	0	0
<i>L<sub>Q</sub></i>	0	0	0	0	0	0
<i>L<sub>R</sub></i>	0	0	0	0	0	0
Totalt	21	18	15	6	3	0

**Tabell D9:** Antall innkoblinger mot feil i seksjoner

Siden sannsynlighet for at feil varierer langs radialen er forventningsverdier for antall innkobling mot varig feil for hver seksjon beregnet, se tabell D10.

Seksjoner	Årlig forventet antall innkobling mot varig feil [antall/år]					
	Seksjon 1	Seksjon 2	Seksjon 3	Seksjon 4	Seksjon 5	Seksjon 6
Antall	0.890	0.835	0.723	0.417	0.223	0.00

**Tabell D10:** Årlig antall forventede innkoblinger mot feil i seksjoner

Tabell D11 viser de forventede KILE-kostnadene for hvert lastpunkt gitt feilende komponent.

Feilende Komp.	Forventet KILE-kostnader for lastpunkter [NOK]											
	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$	$P_5$	$P_6$	$P_7$	$P_8$	$P_9$	$P_{10}$	$P_{11}$	$P_{12}$
$L_A$	444	444	105	105	82	82	39	39	28	28	18	18
$L_B$	472	472	105	105	82	82	39	39	28	28	18	18
$L_C$	423	423	105	105	82	82	39	39	28	28	18	18
$L_D$	329	329	738	738	182	182	79	79	56	56	35	35
$L_E$	329	329	826	826	182	182	79	79	56	56	35	35
$L_F$	329	329	826	826	182	182	79	79	56	56	35	35
$L_G$	314	314	258	258	722	722	99	99	70	70	44	44
$L_H$	314	314	258	258	836	836	99	99	70	70	44	44
$L_I$	314	314	258	258	836	836	99	99	70	70	44	44
$L_J$	446	446	366	366	286	286	828	828	131	131	89	89
$L_K$	446	446	366	366	286	286	1005	1005	131	131	89	89
$L_L$	446	446	366	366	286	286	1005	1005	131	131	89	89
$L_M$	627	627	512	512	397	397	303	303	785	785	135	135
$L_N$	627	627	512	512	397	397	303	303	983	983	135	135
$L_O$	627	627	512	512	397	397	303	303	983	983	135	135
$L_P$	672	672	550	550	429	429	325	325	236	236	672	672
$L_Q$	672	672	550	550	429	429	325	325	236	236	797	797
$L_R$	672	672	550	550	429	429	325	325	236	236	923	923
<b>Totalt</b>	8503	8503	7763	7763	6522	6522	5373	5373	4314	4314	3355	3355

**Tabell D11:** Forventede KILE-kostnader

Tabell D12 viser en oppsummering av ulike pålitelighetsindekser for gitt seksjoneringsmetodikk.

Pålitelighetsindekser	
$P_{Avbrutt}$ [kW/år]	1202.0
ILE [kWh/år]	1670.1
SAIDI [min/år]	83.5071
ASAI [-]	0.999841
KILE [NOK/år]	71660 ,-

**Tabell D12:** Pålitelighetsindekser for gitt seksjoneringsmetodikk

## D.2: Halveringsprinsippet - halvering av lengde av radial

Følgende resultater gjelder for seksjoneringsmetodikken *halvering av lengde på radial*. Lengden av kraftlinjene er definert i delkapittel 8.1.1. Tabell D13 viser gjennomsnittlig avbruddsvarigheter for hver seksjon gitt feilende komponent.

Feilende Komp.	Gjennomsnittlig avbruddsvarighet ( $r$ ) for seksjoner [timer]					
	Seksjon 1	Seksjon 2	Seksjon 3	Seksjon 4	Seksjon 5	Seksjon 6
$L_A$	4.700	1.468	1.132	0.735	0.392	0.392
$L_B$	4.985	1.468	1.132	0.735	0.392	0.392
$L_C$	4.474	1.468	1.132	0.735	0.392	0.392
$L_D$	1.342	4.161	1.132	0.735	0.392	0.392
$L_E$	1.342	4.732	1.132	0.735	0.392	0.392
$L_F$	1.342	4.732	1.132	0.735	0.392	0.392
$L_G$	0.990	0.990	3.880	0.735	0.392	0.392
$L_H$	0.990	0.990	4.595	0.735	0.392	0.392
$L_I$	0.990	0.990	4.595	0.735	0.392	0.392
$L_J$	0.563	0.563	0.563	3.597	0.392	0.392
$L_K$	0.563	0.563	0.563	4.597	0.392	0.392
$L_L$	0.563	0.563	0.563	4.597	0.392	0.392
$L_M$	0.815	0.815	0.815	0.815	3.920	0.628
$L_N$	0.815	0.815	0.815	0.815	5.063	0.628
$L_O$	0.815	0.815	0.815	0.815	5.63	0.628
$L_P$	0.620	0.620	0.620	0.620	0.620	3.485
$L_Q$	0.620	0.620	0.620	0.620	0.620	4.200
$L_R$	0.620	0.620	0.620	0.620	0.620	4.914
Totalt	27.15	27.00	25.86	23.71	20.61	19.18

Tabell D13: Gjennomsnittlig avbruddsvarighet ( $r$ ) i seksjoner

Tabell D14 viser årlig forventet avbruddsvarighet i hver seksjon for gitt seksjoneringsmetodikk. Her er feilsannsynligheten til kraftlinjene benyttet til å beregne en forventningsverdi for avbruddsvarighet.

Seksjoner Varighet	Årlig forventet avbruddsvarighet i seksjoner [timer/år]					
	Seksjon 1	Seksjon 2	Seksjon 3	Seksjon 4	Seksjon 5	Seksjon 6
	1.013	1.189	1.259	1.409	1.411	1.505

Tabell D14: Årlig forventet avbruddsvarighet i seksjoner

Kraftlinjer, brytere, fordelingstrafoer og sikringer i de ulike seksjonene vil bli berørt av store feilstrømmer ved innkobling mot varig feil. Ut i fra seksjoneringsforløpene er antall innkoblinger mot feil for hver seksjon gitt feilende komponent registrert, se tabell D15.

Feilende Komp.	Antall innkoblinger mot feil i seksjoner [-]					
	Seksjon 1	Seksjon 2	Seksjon 3	Seksjon 4	Seksjon 5	Seksjon 6
<i>L<sub>A</sub></i>	4	3	2	1	0	0
<i>L<sub>B</sub></i>	4	3	2	1	0	0
<i>L<sub>C</sub></i>	4	3	2	1	0	0
<i>L<sub>D</sub></i>	3	3	2	1	0	0
<i>L<sub>E</sub></i>	3	3	2	1	0	0
<i>L<sub>F</sub></i>	3	3	2	1	0	0
<i>L<sub>G</sub></i>	2	2	2	1	0	0
<i>L<sub>H</sub></i>	2	2	2	1	0	0
<i>L<sub>I</sub></i>	2	2	2	1	0	0
<i>L<sub>J</sub></i>	1	1	1	1	0	0
<i>L<sub>K</sub></i>	1	1	1	1	0	0
<i>L<sub>L</sub></i>	1	1	1	1	0	0
<i>L<sub>M</sub></i>	1	1	1	1	1	0
<i>L<sub>N</sub></i>	1	1	1	1	1	0
<i>L<sub>O</sub></i>	1	1	1	1	1	0
<i>L<sub>P</sub></i>	0	0	0	0	0	0
<i>L<sub>Q</sub></i>	0	0	0	0	0	0
<i>L<sub>R</sub></i>	0	0	0	0	0	0
Totalt	33	30	24	15	3	0

**Tabell D15:** Antall innkoblinger mot feil i seksjoner

Siden sannsynlighet for at feil varierer langs radialen er forventningsverdier for antall innkobling mot varig feil for hver seksjon beregnet, se tabell D16.

Seksjoner	Årlig forventet antall innkobling mot varig feil [antall/år]					
	Seksjon 1	Seksjon 2	Seksjon 3	Seksjon 4	Seksjon 5	Seksjon 6
Antall	1.252	1.196	1.030	0.723	0.223	0.00

**Tabell D16:** Årlig antall forventede innkoblinger mot feil i seksjoner

Tabell D17 viser de forventede KILE-kostnadene for hvert lastpunkt gitt feilende komponent.

Feilende Komp.	Forventet KILE-kostnader for lastpunkter [NOK]											
	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$	$P_5$	$P_6$	$P_7$	$P_8$	$P_9$	$P_{10}$	$P_{11}$	$P_{12}$
$L_A$	502	502	164	164	106	106	59	59	28	28	18	18
$L_B$	530	530	164	164	106	106	59	59	28	28	18	18
$L_C$	480	480	164	164	106	106	59	59	28	28	18	18
$L_D$	371	371	772	772	212	212	118	118	56	56	35	35
$L_E$	371	371	860	860	212	212	118	118	56	56	35	35
$L_F$	371	371	860	860	212	212	118	118	56	56	35	35
$L_G$	382	382	311	311	761	761	148	148	70	70	44	44
$L_H$	382	382	311	311	867	867	148	148	70	70	44	44
$L_I$	382	382	311	311	867	867	148	148	70	70	44	44
$L_J$	351	351	290	290	229	229	783	783	97	97	62	62
$L_K$	351	351	290	290	229	229	967	967	97	97	62	62
$L_L$	351	351	290	290	229	229	967	967	97	97	62	62
$L_M$	525	525	430	430	335	335	254	254	745	745	104	104
$L_N$	525	525	430	430	335	335	254	254	944	944	104	104
$L_O$	525	525	430	430	335	335	254	254	944	944	104	104
$L_P$	536	536	442	442	348	348	262	262	188	188	633	633
$L_Q$	536	536	442	442	348	348	262	262	188	188	758	758
$L_R$	536	536	442	442	348	348	262	262	188	188	884	884
<b>Totalt</b>	8007	8007	7403	7403	6185	6185	5240	5240	3950	3950	3064	3064

**Tabell D17:** Forventede KILE-kostnader

Tabell D18 viser en oppsummering av ulike pålitelighetsindekser for gitt seksjoneringsmetodikk.

Pålitelighetsindekser	
$P_{Avbrutt}$ [kW/år]	1202.0
ILE [kWh/år]	1557.1
SAIDI [min/år]	77.8540
ASAI [-]	0.999852
KILE [NOK/år]	67698 ,-

**Tabell D18:** Pålitelighetsindekser for gitt seksjoneringsmetodikk

---

### D.3: Halveringsprinsippet - halvering av feilfrekvens

På grunn av strukturen av luftnett-modellen og symmetrien i input-parameterene vil seksjoneringsmetodikken “Halveringsprinsippet - halvering av feilfrekvens” gi samme seksjoneringsforløp som “Halveringsprinsippet - halvering av lengde på radial”. Dersom strukturen eller enkelte parametere derimot endres vil seksjoneringsmetodikkene gi forskjellige resultater.

### D.4: Halveringsprinsippet - halvering av KILE-satser

Følgende resultater gjelder for seksjoneringsmetodikken *halvering av KILE-satser*. Seksjoneringsmetodikken *halvering av KILE-satser* er avhengig av kundesammensetningen i de ulike lastpunktene. Ved hjelp av kostnadsfunksjonene er de spesifikke avbruddskostnadene beregnet og vektet ut i fra kundesammensetningene i lastpunktene. I beregningene av de spesifikke kostnadene er avbruddsvarigheten ( $r$ ) satt lik 1 time. Tabell D19 viser gjennomsnittlig avbruddsvarigheter for hver seksjon gitt feilende komponent.

Feilende Komp.	Gjennomsnittlig avbruddsvarighet ( $r$ ) for seksjoner [timer]					
	Seksjon 1	Seksjon 2	Seksjon 3	Seksjon 4	Seksjon 5	Seksjon 6
$L_A$	3.876	0.645	0.392	0.392	0.392	0.392
$L_B$	4.162	0.645	0.392	0.392	0.392	0.392
$L_C$	3.651	0.645	0.392	0.392	0.392	0.392
$L_D$	0.518	3.337	0.392	0.392	0.392	0.392
$L_E$	0.518	3.909	0.392	0.392	0.392	0.392
$L_F$	0.518	3.909	0.392	0.392	0.392	0.392
$L_G$	0.725	0.725	3.615	0.583	0.583	0.583
$L_H$	0.725	0.725	4.330	0.583	0.583	0.583
$L_I$	0.725	0.725	4.330	0.583	0.583	0.583
$L_J$	0.977	0.977	0.977	4.010	0.805	0.805
$L_K$	0.977	0.977	0.977	5.010	0.805	0.805
$L_L$	0.977	0.977	0.977	5.010	0.805	0.805
$L_M$	1.228	1.228	1.228	1.228	4.333	1.042
$L_N$	1.228	1.228	1.228	1.228	5.476	1.042
$L_O$	1.228	1.228	1.228	1.228	5.476	1.042
$L_P$	1.033	1.033	1.033	1.033	1.033	3.899
$L_Q$	1.033	1.033	1.033	1.033	1.033	4.613
$L_R$	1.033	1.033	1.033	1.033	1.033	5.327
Totalt	25.13	24.98	24.34	24.92	24.90	23.48

Tabell D19: Gjennomsnittlig avbruddsvarighet ( $r$ ) i seksjoner

Tabell D20 viser årlig forventet avbruddsvarighet i hver seksjon for gitt seksjoneringsmetodikk. Her er feilsannsynligheten til kraftlinjene benyttet til å beregne en forventningsverdi for avbruddsvarighet.

Seksjoner Varighet	Årlig forventet avbruddsvarighet i seksjoner [timer/år]					
	Seksjon 1	Seksjon 2	Seksjon 3	Seksjon 4	Seksjon 5	Seksjon 6
	1.127	1.302	1.386	1.618	1.725	1.819

Tabell D20: Årlig forventet avbruddsvarighet i seksjoner



Kraftlinjer, brytere, fordelingstrafoer og sikringer i de ulike seksjonene vil bli berørt av store feilstrømmer ved innkobling mot varig feil. Ut i fra seksjoneringsforløpene er antall innkoblinger mot feil for hver seksjon gitt feilende komponent registrert, se tabell D21.

Feilende Komp.	Antall innkoblinger mot feil i seksjoner [-]					
	Seksjon 1	Seksjon 2	Seksjon 3	Seksjon 4	Seksjon 5	Seksjon 6
<i>L<sub>A</sub></i>	2	1	0	0	0	0
<i>L<sub>B</sub></i>	2	1	0	0	0	0
<i>L<sub>C</sub></i>	2	1	0	0	0	0
<i>L<sub>D</sub></i>	1	1	0	0	0	0
<i>L<sub>E</sub></i>	1	1	0	0	0	0
<i>L<sub>F</sub></i>	1	1	0	0	0	0
<i>L<sub>G</sub></i>	1	1	1	0	0	0
<i>L<sub>H</sub></i>	1	1	1	0	0	0
<i>L<sub>I</sub></i>	1	1	1	0	0	0
<i>L<sub>J</sub></i>	1	1	1	1	0	0
<i>L<sub>K</sub></i>	1	1	1	1	0	0
<i>L<sub>L</sub></i>	1	1	1	1	0	0
<i>L<sub>M</sub></i>	1	1	1	1	1	0
<i>L<sub>N</sub></i>	1	1	1	1	1	0
<i>L<sub>O</sub></i>	1	1	1	1	1	0
<i>L<sub>P</sub></i>	0	0	0	0	0	0
<i>L<sub>Q</sub></i>	0	0	0	0	0	0
<i>L<sub>R</sub></i>	0	0	0	0	0	0
Totalt	18	15	9	6	3	0

**Tabell D21:** Antall innkoblinger mot feil i seksjoner

Siden sannsynlighet for at feil varierer langs radialen er forventningsverdier for antall innkobling mot varig feil for hver seksjon beregnet, se tabell D22.

Seksjoner	Årlig forventet antall innkobling mot varig feil [antall/år]					
	Seksjon 1	Seksjon 2	Seksjon 3	Seksjon 4	Seksjon 5	Seksjon 6
Antall	0.779	0.723	0.557	0.417	0.223	0.000

**Tabell D22:** Årlig antall forventede innkoblinger mot feil i seksjoner

Tabell D23 viser de forventede KILE-kostnadene for hvert lastpunkt gitt feilende komponent.

Feilende Komp.	Forventet KILE-kostnader for lastpunkter [NOK]											
	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$	$P_5$	$P_6$	$P_7$	$P_8$	$P_9$	$P_{10}$	$P_{11}$	$P_{12}$
$L_A$	423	423	91	91	53	53	39	39	28	28	18	18
$L_B$	450	450	91	91	53	53	39	39	28	28	18	18
$L_C$	402	402	91	91	53	53	39	39	28	28	18	18
$L_D$	189	189	638	638	106	106	79	79	56	56	35	35
$L_E$	189	189	733	733	106	106	79	79	56	56	35	35
$L_F$	189	189	733	733	106	106	79	79	56	56	35	35
$L_G$	300	300	247	247	714	714	126	126	90	90	61	61
$L_H$	300	300	247	247	830	830	126	126	90	90	61	61
$L_I$	300	300	247	247	830	830	126	126	90	90	61	61
$L_J$	528	528	431	431	334	334	867	867	160	160	113	113
$L_K$	528	528	431	431	334	334	1038	1038	160	160	113	113
$L_L$	528	528	431	431	334	334	1038	1038	160	160	113	113
$L_M$	699	699	576	576	452	452	347	347	818	818	162	162
$L_N$	699	699	576	576	452	452	347	347	1016	1016	162	162
$L_O$	699	690	576	576	452	452	347	347	1016	1016	162	162
$L_P$	782	782	639	639	495	495	378	378	275	275	705	705
$L_Q$	782	782	639	639	495	495	378	378	275	275	831	831
$L_R$	782	782	639	639	495	495	378	378	275	275	957	957
<b>Totalt</b>	8769	8769	8056	8056	6694	6694	5850	5850	4677	4677	3660	3660

**Tabell D23:** Forventede KILE-kostnader

Tabell D24 viser en oppsummering av ulike pålitelighetsindekser for gitt seksjoneringsmetodik.

Pålitelighetsindekser	
$P_{Avbrutt}$ [kW/år]	1202.0
ILE [kWh/år]	1795.3
SAIDI [min/år]	89.7640
ASAI [-]	0.999829
KILE [NOK/år]	75412 ,-

**Tabell D24:** Pålitelighetsindekser for gitt seksjoneringsmetodik

---

## D.5: Halveringsprinsippet - halvering av forventet KILE

På grunn av strukturen av luftnett-modellen og symmetrien i input-parameterene vil “Halveringsprinsippet - halvering av forventet KILE” gi samme seksjoneringsforløp som “Halveringsprinsippet - halvering av antall nettstasjoner” med sekundærkriteriet “nærmeste nettstasjon”. Dersom input-parametrene feilfrekvens, lengde på kraftlinjer eller kundesammensetning derimot forandres vil også metodikkene gi ulike resultater.

## D.6: Sekvensiell seksjonering

Følgende resultater gjelder for seksjoneringsmetodikken *sekvensiell seksjonering*. Seksjoneringsmetodikken *sekvensiell seksjonering* er uavhengig lengder av kraftlinjer, antall nettstasjoner, feilsannsynligheter og KILE-satser. Tabell D25 viser gjennomsnittlig avbruddsvarigheter for hver seksjon gitt feilende komponent.

Feilende Komp.	Gjennomsnittlig avbruddsvarighet ( $r$ ) for seksjoner [timer]					
	Seksjon 1	Seksjon 2	Seksjon 3	Seksjon 4	Seksjon 5	Seksjon 6
$L_A$	3.521	0.392	0.392	0.392	0.392	0.392
$L_B$	3.807	0.392	0.392	0.392	0.392	0.392
$L_C$	3.296	0.392	0.392	0.392	0.392	0.392
$L_D$	0.695	3.514	0.568	0.568	0.568	0.568
$L_E$	0.695	4.085	0.568	0.568	0.568	0.568
$L_F$	0.695	4.085	0.568	0.568	0.568	0.568
$L_G$	0.902	0.902	3.792	0.760	0.760	0.760
$L_H$	0.902	0.902	4.506	0.760	0.760	0.760
$L_I$	0.902	0.902	4.506	0.760	0.760	0.760
$L_J$	1.153	1.153	1.153	4.187	0.982	0.982
$L_K$	1.153	1.153	1.153	5.187	0.982	0.982
$L_L$	1.153	1.153	1.153	5.187	0.982	0.982
$L_M$	1.405	1.405	1.405	1.405	4.510	1.218
$L_N$	1.405	1.405	1.405	1.405	5.653	1.218
$L_O$	1.405	1.405	1.405	1.405	5.653	1.218
$L_P$	1.210	1.210	1.210	1.210	1.210	4.075
$L_Q$	1.210	1.210	1.210	1.210	1.210	4.790
$L_R$	1.210	1.210	1.210	1.210	1.210	5.504
Totalt	26.72	26.87	26.99	27.57	26.55	26.13

Tabell D25: Gjennomsnittlig avbruddsvarighet ( $r$ ) i seksjoner

Tabell D26 viser årlig forventet avbruddsvarighet i hver seksjon for gitt seksjoneringsmetodikk. Her er feilsannsynligheten til kraftlinjene benyttet til å beregne en forventningsverdi for avbruddsvarighet.

Seksjoner Varighet	Årlig forventet avbruddsvarighet i seksjoner [timer/år]					
	Seksjon 1	Seksjon 2	Seksjon 3	Seksjon 4	Seksjon 5	Seksjon 6
	1.274	1.455	1.553	1.786	1.892	1.986

Tabell D26: Årlig forventet avbruddsvarighet i seksjoner

Kraftlinjer, brytere, fordelingstrafoer og sikringer i de ulike seksjonene vil bli berørt av store feilstrømmer ved innkobling mot varig feil. Ut i fra seksjoneringsforløpene er antall innkoblinger mot feil for hver seksjon gitt feilende komponent registrert, se tabell D27.

Feilende Komp.	Antall innkoblinger mot feil i seksjoner [-]					
	Seksjon 1	Seksjon 2	Seksjon 3	Seksjon 4	Seksjon 5	Seksjon 6
<i>L<sub>A</sub></i>	1	0	0	0	0	0
<i>L<sub>B</sub></i>	1	0	0	0	0	0
<i>L<sub>C</sub></i>	1	0	0	0	0	0
<i>L<sub>D</sub></i>	1	1	0	0	0	0
<i>L<sub>E</sub></i>	1	1	0	0	0	0
<i>L<sub>F</sub></i>	1	1	0	0	0	0
<i>L<sub>G</sub></i>	1	1	1	0	0	0
<i>L<sub>H</sub></i>	1	1	1	0	0	0
<i>L<sub>I</sub></i>	1	1	1	0	0	0
<i>L<sub>J</sub></i>	1	1	1	1	0	0
<i>L<sub>K</sub></i>	1	1	1	1	0	0
<i>L<sub>L</sub></i>	1	1	1	1	0	0
<i>L<sub>M</sub></i>	1	1	1	1	1	0
<i>L<sub>N</sub></i>	1	1	1	1	1	0
<i>L<sub>O</sub></i>	1	1	1	1	1	0
<i>L<sub>P</sub></i>	0	0	0	0	0	0
<i>L<sub>Q</sub></i>	0	0	0	0	0	0
<i>L<sub>R</sub></i>	0	0	0	0	0	0
Totalt	15	12	9	6	3	0

**Tabell D27:** Antall innkoblinger mot feil i seksjoner

Siden sannsynlighet for at feil varierer langs radialen er forventningsverdier for antall innkobling mot varig feil for hver seksjon beregnet, se tabell D28.

Seksjoner	Årlig forventet antall innkobling mot varig feil [antall/år]					
	Seksjon 1	Seksjon 2	Seksjon 3	Seksjon 4	Seksjon 5	Seksjon 6
Antall	0.723	0.668	0.557	0.417	0.223	0.00

**Tabell D28:** Årlig antall forventede innkoblinger mot feil i seksjoner

Tabell D29 viser de forventede KILE-kostnadene for hvert lastpunkt gitt feilende komponent.

Feilende Komp.	Forventet KILE-kostnader for lastpunkter [NOK]											
	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$	$P_5$	$P_6$	$P_7$	$P_8$	$P_9$	$P_{10}$	$P_{11}$	$P_{12}$
$L_A$	390	390	66	66	53	53	39	39	28	28	18	18
$L_B$	416	416	66	66	53	53	39	39	28	28	18	18
$L_C$	369	369	66	66	53	53	39	39	28	28	18	18
$L_D$	233	233	667	667	132	132	99	99	71	71	48	48
$L_E$	233	233	761	761	132	132	99	99	71	71	48	48
$L_F$	233	233	761	761	132	132	99	99	71	71	48	48
$L_G$	354	354	290	290	746	746	151	151	109	109	77	77
$L_H$	354	354	290	290	855	855	151	151	109	109	77	77
$L_I$	354	354	290	290	855	855	151	151	109	109	77	77
$L_J$	587	587	482	482	377	377	897	897	186	186	135	135
$L_K$	587	587	482	482	377	377	1068	1068	186	186	135	135
$L_L$	587	587	482	482	377	377	1068	1068	186	186	135	135
$L_M$	765	765	634	634	503	503	388	388	849	849	187	187
$L_N$	765	765	634	634	503	503	388	388	1046	1046	187	187
$L_O$	765	765	634	634	503	503	388	388	1046	1046	187	187
$L_P$	865	865	712	712	559	559	429	429	315	315	737	737
$L_Q$	865	865	712	712	559	559	429	429	315	315	862	862
$L_R$	865	865	712	712	559	559	429	429	315	315	988	988
<b>Totalt</b>	9587	9587	8741	8741	7328	7328	6351	6351	5068	5068	3982	3982

**Tabell D29:** Forventede KILE-kostnader

Tabell D30 viser en oppsummering av ulike pålitelighetsindekser for gitt seksjoneringsmetodik.

Pålitelighetsindekser	
$P_{Avbrutt}$ [kW/år]	1202.0
ILE [kWh/år]	1989.1
SAIDI [min/år]	99.4536
ASAI [-]	0.999811
KILE [NOK/år]	82114 ,-

**Tabell D30:** Pålitelighetsindekser for gitt seksjoneringsmetodik

---

## Vedlegg E: Resultater fra kabelnett-modell

I følgende vedlegg blir alle resultater av pålitelighetsanalyser for de ulike seksjoneringsmetodikkene i kabelnett-modellen presentert. I kapittel 9 er fremgangsmåten for beregning av resultatene detaljert beskrevet.

### E.1: Halveringsprinsippet - halvering av antall nettstasjoner

#### E. 1.1: Sekundærkriterie - Nærmeste nettstasjon

Følgende resultater gjelder for seksjoneringsmetodikken *halvering av antall nettstasjoner* med sekundærkriteriet *nærmeste nettstasjon*. Sekundærkriteriet går ut på velge bryteren nærmest forrige seksjoneringspunkt dersom det oppstår tilfeller hvor to brytere tilfredsstiller krav om halvering av antall nettstasjoner. Siden kabelnett seksjoneres ved hjelp av prøvekoblinger og isolasjonsmålinger er begge metodene analysert for hver seksjoneringsmetodikk.

#### Prøvekobling:

Tabell E31 viser gjennomsnittlig avbruddsvarigheter for hvert lastpunkt gitt feilende kabelstrekning.

Feilende Komp.	Avbruddsvarighet ( $r$ ) [timer]				
	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$	$P_5$
$L_A$	0.916	0.632	0.450	0.392	0.392
$L_B$	0.755	0.632	0.450	0.392	0.392
$L_C$	0.545	0.612	0.450	0.392	0.392
$L_D$	0.674	0.674	0.674	0.583	0.524
$L_E$	0.798	0.798	0.798	0.798	0.720
$L_F$	0.645	0.645	0.645	0.645	0.645
Totalt	4.332	3.992	3.467	3.201	3.064

**Tabell E31:** Gjennomsnittlig avbruddvarighet ( $r$ ) i lastpunkter

Tabell E32 viser årlig forventet avbruddsvarighet for hvert lastpunkt for gitt seksjoneringsmetodikk og seksjoneringsmetode. Her er feilsannsynligheten til kraftkablene benyttet til å beregne en forventningsverdi for avbruddsvarighet.

Lastpunkt	Årlig ventet avbruddsvarighet [timer/år]				
	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$	$P_5$
Totalt	0.1210	0.1041	0.0846	0.0764	0.0740

**Tabell E32:** Årlig forventet avbruddsvarighet i lastpunkter

Tabell E33 viser antall innkoblinger mot feil i alle seksjoner gitt feil på kabelstrekninger. Resultatene baserer seg på seksjoneringsforløpet fra seksjoneringsmetodikken beskrevet i kapittel 6.3.

Feilende Komp.	Antall innkoblinger mot feil i seksjoner [-]					
	Seksjon 1	Seksjon 2	Seksjon 3	Seksjon 4	Seksjon 5	Seksjon 6
$L_A$	3	2	1	0	0	0
$L_B$	2	2	1	0	0	0
$L_C$	1	1	1	0	0	0
$L_D$	1	1	1	1	0	0
$L_E$	1	1	1	1	1	0
$L_F$	1	1	0	0	0	0
Totalt	8	7	5	2	1	0

Tabell E33: Antall innkoblinger mot feil i seksjoner

I og med at feilsannsynlighet varierer langs radialen er en forventningsverdi for antall innkobling mot varig feil beregnet, se tabell E34.

Seksjon	Innkobling mot feil [antall/år]					
	1	2	3	4	5	6
Totalt	0.280	0.230	0.145	0.035	0.015	0.000

Tabell E34: Årlig antall forventede innkoblinger mot feil i seksjoner

Tabell E35 viser de forventede KILE-kostnadene for hvert lastpunkt gitt feilende kabelstrekning. Beløpene er avrundet til nærmeste hele krone.

Feilende Komp.	Forventet KILE [NOK]				
	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$	$P_5$
$L_A$	1360	1380	1257	1446	1608
$L_B$	818	966	880	1012	1126
$L_C$	461	674	629	723	804
$L_D$	429	580	678	760	785
$L_E$	366	497	581	723	744
$L_F$	312	421	491	614	685
Totalt	3746	4518	4516	5278	5752

Tabell E35: Forventet KILE-kostnader i lastpunkter

Tabell E36 viser en oppsummering av ulike pålitelighetsindekser for gitt seksjoneringsmetodik og seksjoneringsmetode.

Pålitelighetsindekser	
$P_{Avbrutt}$ [kW/år]	400.0
ILE [kWh/år]	230,0
SAIDI [min/sluttbr. år]	5.52
ASAI [-]	0.9999895
KILE [NOK/år]	23810 ,-

Tabell E36: Pålitelighetsindekser for gitt seksjoneringsmetodik

---

## Isolasjonsmåling:

Tabell E37 viser gjennomsnittlig avbruddsvarigheter for hvert lastpunkt gitt feilende kabelstrekning.

Feilende Komp.	Avbruddsvarighet ( $r$ ) [timer]				
	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$	$P_5$
$L_A$	1.891	1.282	0.783	0.783	0.783
$L_B$	1.738	1.282	0.783	0.783	0.783
$L_C$	1.270	1.270	0.783	0.783	0.783
$L_D$	0.717	0.717	0.717	1.199	1.199
$L_E$	0.717	0.717	0.717	1.207	1.710
$L_F$	0.717	0.717	0.717	1.207	1.714
<b>Totalt</b>	<b>7.049</b>	<b>5.983</b>	<b>4.500</b>	<b>5.963</b>	<b>6.973</b>

**Tabell E37:** Gjennomsnittlig avbruddsvarighet ( $r$ ) i lastpunkter

Tabell E38 viser årlig forventet avbruddsvarighet for hvert lastpunkt for gitt seksjoneringsmetodikk og seksjoneringsmetode. Her er feilsannsynligheten til kraftkablene benyttet til å beregne en forventningsverdi for avbruddsvarighet.

Lastpunkt	Årlig ventet avbruddsvarighet [timer/år]				
	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$	$P_5$
<b>Totalt</b>	<b>0.2230</b>	<b>0.1765</b>	<b>0.1220</b>	<b>0.1464</b>	<b>0.1615</b>

**Tabell E38:** Årlig forventet avbruddsvarighet i lastpunkter

Tabell E39 viser de forventede KILE-kostnadene for hvert lastpunkt gitt feilende kabelstrekning. Beløpene er avrundet til nærmeste hele krone.

Feilende Komp.	Forventet KILE [NOK]				
	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$	$P_5$
$L_A$	2124	2255	1908	2376	2651
$L_B$	1406	1578	1336	1663	1856
$L_C$	829	1122	954	1188	1325
$L_D$	450	609	711	1251	1397
$L_E$	337	457	533	941	1256
$L_F$	337	457	533	941	1257
<b>Totalt</b>	<b>5483</b>	<b>6478</b>	<b>5975</b>	<b>8360</b>	<b>9742</b>

**Tabell E39:** Forventet KILE-kostnader i lastpunkter

Tabell E40 viser en oppsummering av ulike pålitelighetsindekser for gitt seksjoneringsmetodikk og seksjoneringsmetode.

Pålitelighetsindekser	
$P_{Avbrutt}$ [kW/år]	400.0
ILE [kWh/år]	414.7
SAIDI [min/år]	9.95
ASAI [-]	0.9999811
KILE [NOK/år]	36038 ,-

**Tabell E40:** Pålitelighetsindekser for gitt seksjoneringsmetodikk



---

### E. 1.2: Sekundærkriterie - Sannsynlighet for innkobling mot varig feil

I følgende analyse er sekundærkriteriet *sannsynlighet for innkobling mot varig feil* benyttet. I tilfeller hvor to seksjoneringspunkter tilfredsstiller krav om halvering av antall nettstasjoner velges nettstasjonen som gir lavest sannsynlighet for innkobling mot feil.

#### Prøvekobling:

Tabell E41 viser gjennomsnittlig avbruddsvarigheter for hvert lastpunkt gitt feilende kabelstrekning.

Feilende Komp.	Avbruddsvarighet ( $r$ ) [timer]				
	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$	$P_5$
$L_A$	0.754	0.754	0.450	0.392	0.392
$L_B$	0.994	0.871	0.450	0.392	0.392
$L_C$	0.718	0.718	0.450	0.392	0.392
$L_D$	0.674	0.674	0.674	0.583	0.524
$L_E$	0.798	0.798	0.798	0.798	0.720
$L_F$	0.645	0.645	0.645	0.645	0.645
Totalt	4.583	4.460	3.467	3.201	3.064

**Tabell E41:** Gjennomsnittlig avbruddsvarighet ( $r$ ) i lastpunkter

Tabell E42 viser årlig forventet avbruddsvarighet for hvert lastpunkt for gitt seksjoneringsmetodikk og seksjoneringsmetode. Her er feilsannsynligheten til kraftkablene benyttet til å beregne en forventningsverdi for avbruddsvarighet.

Lastpunkt	Årlig ventet avbruddsvarighet [timer/år]				
	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$	$P_5$
Totalt	0.1256	0.1213	0.0846	0.0764	0.0740

**Tabell E42:** Årlig forventet avbruddsvarighet i lastpunkter

Tabell E43 viser antall innkoblinger mot feil i alle seksjoner gitt feil på kabelstrekninger. Resultatene baserer seg på seksjoneringsforløpet fra seksjoneringsmetodikken beskrevet i kapittel 6.3.

Feilende Komp.	Antall innkoblinger mot feil i seksjoner [-]					
	Seksjon 1	Seksjon 2	Seksjon 3	Seksjon 4	Seksjon 5	Seksjon 6
$L_A$	2	1	1	0	0	0
$L_B$	2	2	1	0	0	0
$L_C$	1	1	1	0	0	0
$L_D$	1	1	1	1	0	0
$L_E$	1	1	1	1	1	0
$L_F$	0	0	0	0	0	0
Totalt	7	6	5	2	1	0

Tabell E43: Antall innkoblinger mot feil i seksjoner

I og med at feilsannsynlighet varierer langs radialen er en forventningsverdi for antall innkobling mot varig feil beregnet, se tabell E44.

Seksjon	Innkobling mot feil [antall/år]					
	1	2	3	4	5	6
Totalt	0.230	0.180	0.145	0.035	0.015	0.000

Tabell E44: Årlig antall forventede innkoblinger mot feil i seksjoner

Tabell E45 viser de forventede KILE-kostnadene for hvert lastpunkt gitt feilende kabelstrekning. Beløpene er avrundet til nærmeste hele krone.

Feilende Komp.	Forventet KILE [NOK]				
	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$	$P_5$
$L_A$	1169	1585	1257	1446	1608
$L_B$	1016	1245	880	1012	1126
$L_C$	563	762	629	723	804
$L_D$	429	580	678	760	785
$L_E$	366	497	581	723	744
$L_F$	312	421	491	614	685
Totalt	3855	5090	4516	5278	5752

Tabell E45: Forventet KILE-kostnader i lastpunkter

Tabell E46 viser en oppsummering av ulike pålitelighetsindekser for gitt seksjoneringsmetodik og seksjoneringsmetode.

Pålitelighetsindekser	
$P_{Avbrutt}$ [kW/år]	400.0
ILE [kWh/år]	240.9
SAIDI [min/sluttbr. år]	5.78
ASAI [-]	0.9999890
KILE [NOK/år]	24491 ,-

Tabell E46: Pålitelighetsindekser for gitt seksjoneringsmetodik

---

## Isolasjonsmåling:

Tabell E47 viser gjennomsnittlig avbruddsvarigheter for hvert lastpunkt gitt feilende kabelstrekning.

Feilende Komp.	Avbruddsvarighet ( $r$ ) [timer]				
	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$	$P_5$
$L_A$	1.404	1.404	0.783	0.783	0.783
$L_B$	1.231	1.804	0.783	0.783	0.783
$L_C$	1.231	1.746	0.783	0.783	0.783
$L_D$	0.717	0.717	0.717	1.199	1.199
$L_E$	0.717	0.717	0.717	1.207	1.710
$L_F$	0.717	0.717	0.717	1.207	1.714
<b>Totalt</b>	<b>6.017</b>	<b>7.104</b>	<b>4.500</b>	<b>5.963</b>	<b>6.973</b>

Tabell E47: Gjennomsnittlig avbruddsvarighet ( $r$ ) i lastpunkter

Tabell E48 viser årlig forventet avbruddsvarighet for hvert lastpunkt for gitt seksjoneringsmetodikk og seksjoneringsmetode. Her er feilsannsynligheten til kraftkablene benyttet til å beregne en forventningsverdi for avbruddsvarighet.

Lastpunkt	Årlig ventet avbruddsvarighet [timer/år]				
	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$	$P_5$
<b>Totalt</b>	0.1799	0.2122	0.1220	0.1464	0.1615

Tabell E48: Årlig forventet avbruddsvarighet i lastpunkter

Tabell E49 viser de forventede KILE-kostnadene for hvert lastpunkt gitt feilende kabelstrekning. Beløpene er avrundet til nærmeste hele krone.

Feilende Komp.	Forventet KILE [NOK]				
	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$	$P_5$
$L_A$	1759	2369	1908	2376	2651
$L_B$	1141	1921	1336	1663	1856
$L_C$	815	1345	954	1188	1325
$L_D$	450	609	711	1251	1397
$L_E$	337	457	533	941	1256
$L_F$	337	457	533	941	1257
<b>Totalt</b>	<b>4839</b>	<b>7157</b>	<b>5975</b>	<b>8360</b>	<b>9742</b>

Tabell E49: Forventet KILE-kostnader i lastpunkter

Tabell E50 viser en oppsummering av ulike pålitelighetsindekser for gitt seksjoneringsmetodikk og seksjoneringsmetode.

Pålitelighetsindekser	
$P_{Avbrutt}$ [kW/år]	400.0
ILE [kWh/år]	411.3
SAIDI [min/år]	9.87
ASAI [-]	0.9999812
KILE [NOK/år]	36073 ,-

Tabell E50: Pålitelighetsindekser for gitt seksjoneringsmetodikk

---

## E.2: Halveringsprinsippet - halvering av lengde av radial

### Prøvekobling:

Tabell E51 viser gjennomsnittlig avbruddsvarigheter for hvert lastpunkt gitt feilende kabelstrekning.

Feilende Komp.	Avbruddsvarighet ( $r$ ) [timer]				
	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$	$P_5$
$L_A$	0.714	0.450	0.392	0.392	0.392
$L_B$	0.553	0.450	0.392	0.392	0.392
$L_C$	0.855	0.855	0.760	0.603	0.544
$L_D$	0.694	0.694	0.694	0.603	0.544
$L_E$	0.818	0.818	0.818	0.818	0.740
$L_F$	0.665	0.665	0.665	0.655	0.655
Totalt	4.299	3.932	3.720	3.472	3.276

**Tabell E51:** Gjennomsnittlig avbruddvarighet ( $r$ ) i lastpunkter

Tabell E52 viser årlig forventet avbruddsvarighet for hvert lastpunkt for gitt seksjoneringsmetodikk og seksjoneringsmetode. Her er feilsannsynligheten til kraftkablene benyttet til å beregne en forventningsverdi for avbruddsvarighet.

Lastpunkt	Årlig ventet avbruddsvarighet [timer/år]				
	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$	$P_5$
Totalt	0.1126	0.0958	0.0884	0.0827	0.0789

**Tabell E52:** Årlig forventet avbruddsvarighet i lastpunkter

Tabell E53 viser antall innkoblinger mot feil i alle seksjoner gitt feil på kabelstrekninger. Resultatene baserer seg på seksjoneringsforløpet fra seksjoneringsmetodikken beskrevet i kapittel 6.3.

Feilende Komp.	Antall innkoblinger mot feil i seksjoner [-]					
	Seksjon 1	Seksjon 2	Seksjon 3	Seksjon 4	Seksjon 5	Seksjon 6
$L_A$	2	2	0	0	0	0
$L_B$	1	1	0	0	0	0
$L_C$	2	2	2	1	0	0
$L_D$	1	1	1	1	0	0
$L_E$	1	1	1	1	1	0
$L_F$	0	0	0	0	0	0
Totalt	7	7	4	3	1	0

Tabell E53: Antall innkoblinger mot feil i seksjoner

I og med at feilsannsynlighet varierer langs radialen er en forventningsverdi for antall innkobling mot varig feil beregnet, se tabell E54.

Seksjon	Innkobling mot feil [antall/år]					
	1	2	3	4	5	6
Totalt	0.220	0.220	0.085	0.060	0.015	0.000

Tabell E54: Årlig antall forventede innkoblinger mot feil i seksjoner

Tabell E55 viser de forventede KILE-kostnadene for hvert lastpunkt gitt feilende kabelstrekning. Beløpene er avrundet til nærmeste hele krone.

Feilende Komp.	Forventet KILE [NOK]				
	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$	$P_5$
$L_A$	1121	1078	1144	1446	1608
$L_B$	652	755	800	1012	1126
$L_C$	644	876	932	973	1007
$L_D$	439	593	693	779	806
$L_E$	373	507	593	738	760
$L_F$	319	431	503	628	700
Totalt	3548	4240	4665	5576	6007

Tabell E55: Forventet KILE-kostnader i lastpunkter

Tabell E56 viser en oppsummering av ulike pålitelighetsindekser for gitt seksjoneringsmetodik og seksjoneringsmetode.

Pålitelighetsindekser	
$P_{Avbrutt}$ [kW/år]	400.0
ILE [kWh/år]	229.1
SAIDI [min/sluttbr. år]	5.50
ASAI [-]	0.9999895
KILE [NOK/år]	24036 ,-

Tabell E56: Pålitelighetsindekser for gitt seksjoneringsmetodik

---

## Isolasjonsmåling:

Tabell E57 viser gjennomsnittlig avbruddsvarigheter for hvert lastpunkt gitt feilende kabelstrekning.

Feilende Komp.	Avbruddsvarighet ( $r$ ) [timer]				
	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$	$P_5$
$L_A$	1.364	0.783	0.783	0.783	0.783
$L_B$	1.211	0.783	0.783	0.783	0.783
$L_C$	0.717	0.717	1.776	1.219	1.219
$L_D$	0.717	0.717	1.714	1.219	1.219
$L_E$	0.717	0.717	1.247	1.247	1.777
$L_F$	0.717	0.717	1.247	1.247	1.774
<b>Totalt</b>	5.442	4.433	7.551	6.499	7.549

**Tabell E57:** Gjennomsnittlig avbruddsvarighet ( $r$ ) i lastpunkter

Tabell E58 viser årlig forventet avbruddsvarighet for hvert lastpunkt for gitt seksjoneringsmetodikk og seksjoneringsmetode. Her er feilsannsynligheten til kraftkablene benyttet til å beregne en forventningsverdi for avbruddsvarighet.

Lastpunkt	Årlig ventet avbruddsvarighet [timer/år]				
	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$	$P_5$
<b>Totalt</b>	0.1644	0.1203	0.1827	0.1589	0.1746

**Tabell E58:** Årlig forventet avbruddsvarighet i lastpunkter

Tabell E59 viser de forventede KILE-kostnadene for hvert lastpunkt gitt feilende kabelstrekning. Beløpene er avrundet til nærmeste hele krone.

Feilende Komp.	Forventet KILE [NOK]				
	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$	$P_5$
$L_A$	1729	1633	1908	2376	2651
$L_B$	1130	1143	1336	1663	1856
$L_C$	562	761	1581	1576	1760
$L_D$	450	609	1238	1261	1408
$L_E$	337	457	778	956	1280
$L_F$	337	457	778	956	1282
<b>Totalt</b>	4545	5060	7619	8788	10237

**Tabell E59:** Forventet KILE-kostnader i lastpunkter

Tabell E60 viser en oppsummering av ulike pålitelighetsindekser for gitt seksjoneringsmetodikk og seksjoneringsmetode.

Pålitelighetsindekser	
$P_{Avbrutt}$ [kW/år]	400.0
ILE [kWh/år]	400.4
SAIDI [min/år]	9.61
ASAI [-]	0.9999817
KILE [NOK/år]	36249 ,-

**Tabell E60:** Pålitelighetsindekser for gitt seksjoneringsmetodikk

---

### E.3: Halveringsprinsippet - halvering av feilfrekvens

Grunnet symmetrien på nettmodellen vil resultatene for både prøvekoblinger og isolasjonsmålinger av denne seksjoneringsmetodikken gi like resultater som for metodikken *halvering av lengde på radial*.

### E.4: Halveringsprinsippet - halvering av KILE-satser

Grunnet symmetrien på nettmodellen vil resultatene for både prøvekoblinger og isolasjonsmålinger av denne seksjoneringsmetodikken gi like resultater som for metodikken *halvering av antall nettstasjoner*. Det er nødvendig å benytte samme sekundærkriterier som tidligere for å kunne velge seksjoneringspunkt i tilfeller hvor to brytere tilfredsstiller kravet om halvering av KILE-satser.

### E.5: Halveringsprinsippet - halvering av forventet KILE

Følgende resultater gjelder for seksjoneringsmetodikken *halvering av forventet KILE*. Seksjoneringsmetodikken *halvering av forventet KILE* er avhengig av kundesammensetningen i de ulike lastpunktene, feilfrekvenser og lengder av kabelstrekninger. De spesifikke avbruddskostnadene er beregnet med avbruddsvarigheten ( $r$ ) lik 1 time, mens de andre input parameterene er definert i delkapittel 8.2.1.

#### Prøvekobling:

Tabell E61 viser gjennomsnittlig avbruddsvarigheter for hvert lastpunkt gitt feilende kabelstrekning.

Feilende Komp.	Avbruddsvarighet ( $r$ ) [timer]				
	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$	$P_5$
$L_A$	0.783	0.565	0.392	0.392	0.392
$L_B$	0.755	0.565	0.392	0.392	0.392
$L_C$	0.478	0.545	0.392	0.392	0.392
$L_D$	0.674	0.674	0.674	0.583	0.524
$L_E$	0.798	0.798	0.798	0.798	0.720
$L_F$	0.645	0.645	0.645	0.645	0.645
Totalt	4.132	3.792	3.292	3.201	3.064

Tabell E61: Gjennomsnittlig avbruddsvarighet ( $r$ ) i lastpunkter

Tabell E62 viser årlig forventet avbruddsvarighet for hvert lastpunkt for gitt seksjoneringsmetodikk og seksjoneringsmetode. Her er feilsannsynligheten til kraftkablene benyttet til å beregne en forventningsverdi for avbruddsvarighet.

Lastpunkt	Årlig ventet avbruddsvarighet [timer/år]				
	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$	$P_5$
Totalt	0.1126	0.0968	0.0782	0.0764	0.0740

Tabell E62: Årlig forventet avbruddsvarighet i lastpunkter

Tabell E63 viser antall innkoblinger mot feil i alle seksjoner gitt feil på kabelstrekninger. Resultatene baserer seg på seksjoneringsforløpet fra seksjoneringsmetodikken beskrevet i kapittel 6.3.

Feilende Komp.	Antall innkoblinger mot feil i seksjoner [-]					
	Seksjon 1	Seksjon 2	Seksjon 3	Seksjon 4	Seksjon 5	Seksjon 6
$L_A$	3	2	1	0	0	0
$L_B$	2	2	1	0	0	0
$L_C$	1	1	1	0	0	0
$L_D$	1	1	1	1	0	0
$L_E$	1	1	1	1	1	0
$L_F$	0	0	0	0	0	0
Totalt	8	7	5	2	1	0

Tabell E63: Antall innkoblinger mot feil i seksjoner

I og med at feilsannsynlighet varierer langs radialen er en forventningsverdi for antall innkobling mot varig feil beregnet, se tabell E64.

Seksjon	Innkobling mot feil [antall/år]					
	1	2	3	4	5	6
Totalt	0.280	0.230	0.145	0.035	0.015	0.000

Tabell E64: Årlig antall forventede innkoblinger mot feil i seksjoner

Tabell E65 viser de forventede KILE-kostnadene for hvert lastpunkt gitt feilende kabelstrekning. Beløpene er avrundet til nærmeste hele krone.

Feilende Komp.	Forventet KILE [NOK]				
	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$	$P_5$
$L_A$	1202	1269	1144	1446	1608
$L_B$	818	889	800	1012	1126
$L_C$	421	618	572	723	804
$L_D$	429	580	678	760	785
$L_E$	366	497	581	723	744
$L_F$	312	421	491	614	685
Totalt	3548	4274	4266	5278	5752

Tabell E65: Forventet KILE-kostnader i lastpunkter

Tabell E66 viser en oppsummering av ulike pålitelighetsindekser for gitt seksjoneringsmetodik og seksjoneringsmetode.

Pålitelighetsindekser	
$P_{Avbrutt}$ [kW/år]	400.0
ILE [kWh/år]	219.0
SAIDI [min/sluttbr. år]	5.26
ASAI [-]	0.9999900
KILE [NOK/år]	23118 ,-

Tabell E66: Pålitelighetsindekser for gitt seksjoneringsmetodik



---

## Isolasjonsmåling:

Tabell E67 viser gjennomsnittlig avbruddsvarigheter for hvert lastpunkt gitt feilende kabelstrekning.

Feilende Komp.	Avbruddsvarighet ( $r$ ) [timer]				
	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$	$P_5$
$L_A$	1.758	1.215	0.717	0.717	0.717
$L_B$	1.738	1.215	0.717	0.717	0.717
$L_C$	1.203	1.203	0.717	0.717	0.717
$L_D$	0.783	0.783	0.783	1.266	1.266
$L_E$	0.783	0.783	0.783	1.274	1.777
$L_F$	0.783	0.783	0.783	1.274	1.780
<b>Totalt</b>	<b>7.049</b>	<b>5.983</b>	<b>4.500</b>	<b>5.963</b>	<b>6.973</b>

**Tabell E67:** Gjennomsnittlig avbruddsvarighet ( $r$ ) i lastpunkter

Tabell E68 viser årlig forventet avbruddsvarighet for hvert lastpunkt for gitt seksjoneringsmetodikk og seksjoneringsmetode. Her er feilsannsynligheten til kraftkablene benyttet til å beregne en forventningsverdi for avbruddsvarighet.

Lastpunkt	Årlig ventet avbruddsvarighet [timer/år]				
	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$	$P_5$
<b>Totalt</b>	0.2180	0.1725	0.1180	0.1424	0.1575

**Tabell E68:** Årlig forventet avbruddsvarighet i lastpunkter

Tabell E69 viser de forventede KILE-kostnadene for hvert lastpunkt gitt feilende kabelstrekning. Beløpene er avrundet til nærmeste hele krone.

Feilende Komp.	Forventet KILE [NOK]				
	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$	$P_5$
$L_A$	2024	2192	1778	2217	2473
$L_B$	1406	1534	1244	1552	1731
$L_C$	804	1091	889	1109	1237
$L_D$	481	653	763	1284	1433
$L_E$	361	490	572	966	1283
$L_F$	361	490	572	966	1284
<b>Totalt</b>	<b>5437</b>	<b>6450</b>	<b>5818</b>	<b>8094</b>	<b>9441</b>

**Tabell E69:** Forventet KILE-kostnader i lastpunkter

Tabell E70 viser en oppsummering av ulike pålitelighetsindekser for gitt seksjoneringsmetodikk og seksjoneringsmetode.

Pålitelighetsindekser	
$P_{Avbrutt}$ [kW/år]	400.0
ILE [kWh/år]	404.2
SAIDI [min/år]	9.70
ASAI [-]	0.9999815
KILE [NOK/år]	35243 ,-

**Tabell E70:** Pålitelighetsindekser for gitt seksjoneringsmetodikk

---

## E.6: Sekvensiell seksjonering

Følgende resultater gjelder for seksjoneringsmetodikken *sekvensiell seksjonering*. Seksjoneringsmetodikken *sekvensiell seksjonering* er uavhengig lengder av kraftlinjer, antall nettstasjoner, feilsannsynligheter og KILE-satser.

### Prøvekobling:

Tabell E71 viser gjennomsnittlig avbruddsvarigheter for hvert lastpunkt gitt feilende kabelstrekning.

Feilende Komp.	Avbruddsvarighet ( $r$ ) [timer]				
	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$	$P_5$
$L_A$	0.450	0.392	0.392	0.392	0.392
$L_B$	0.698	0.595	0.536	0.536	0.536
$L_C$	0.826	0.826	0.731	0.673	0.673
$L_D$	0.955	0.955	0.955	0.864	0.806
$L_E$	1.080	1.080	1.080	1.080	1.001
$L_F$	0.926	0.926	0.926	0.926	0.926
Totalt	4.935	4.773	4.620	4.471	4.334

**Tabell E71:** Gjennomsnittlig avbruddsvarighet ( $r$ ) i lastpunkter

Tabell E72 viser årlig forventet avbruddsvarighet for hvert lastpunkt for gitt seksjoneringsmetodikk og seksjoneringsmetode. Her er feilsannsynligheten til kraftkablene benyttet til å beregne en forventningsverdi for avbruddsvarighet.

Lastpunkt	Årlig ventet avbruddsvarighet [timer/år]				
	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$	$P_5$
Totalt	0.1168	0.1102	0.1058	0.1025	0.1002

**Tabell E72:** Årlig forventet avbruddsvarighet i lastpunkter

Tabell E73 viser antall innkoblinger mot feil i alle seksjoner gitt feil på kabelstrekninger. Resultatene baserer seg på seksjoneringsforløpet fra seksjoneringsmetodikken beskrevet i kapittel 6.3.

Feilende Komp.	Antall innkoblinger mot feil i seksjoner [-]					
	Seksjon 1	Seksjon 2	Seksjon 3	Seksjon 4	Seksjon 5	Seksjon 6
$L_A$	1	0	0	0	0	0
$L_B$	1	1	0	0	0	0
$L_C$	1	1	1	0	0	0
$L_D$	1	1	1	1	0	0
$L_E$	1	1	1	1	1	0
$L_F$	0	0	0	0	0	0
Totalt	5	4	3	2	1	0

Tabell E73: Antall innkoblinger mot feil i seksjoner

I og med at feilsannsynlighet varierer langs radialen er en forventningsverdi for antall innkobling mot varig feil beregnet, se tabell E74.

Seksjon	Innkobling mot feil [antall/år]					
	1	2	3	4	5	6
Totalt	0.145	0.095	0.06	0.035	0.015	0.000

Tabell E74: Årlig antall forventede innkoblinger mot feil i seksjoner

Tabell E75 viser de forventede KILE-kostnadene for hvert lastpunkt gitt feilende kabelstrekning. Beløpene er avrundet til nærmeste hele krone.

Feilende Komp.	Forventet KILE [NOK]				
	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$	$P_5$
$L_A$	809	981	1144	1446	1608
$L_B$	771	923	998	1253	1395
$L_C$	627	852	903	1057	1179
$L_D$	562	767	897	1027	1084
$L_E$	455	620	724	895	967
$L_F$	411	561	656	814	909
Totalt	3635	4704	5322	6492	7142

Tabell E75: Forventet KILE-kostnader i lastpunkter

Tabell E76 viser en oppsummering av ulike pålitelighetsindekser for gitt seksjoneringsmetodik og seksjoneringsmetode.

Pålitelighetsindekser	
$P_{Avbrutt}$ [kW/år]	400.0
ILE [kWh/år]	267.8
SAIDI [min/sluttbr. år]	6.43
ASAI [-]	0.9999878
KILE [NOK/år]	27295 ,-

Tabell E76: Pålitelighetsindekser for gitt seksjoneringsmetodik

---

## Isolasjonsmåling:

Tabell E77 viser gjennomsnittlig avbruddsvarigheter for hvert lastpunkt gitt feilende kabelstrekning.

Feilende Komp.	Avbruddsvarighet ( $r$ ) [timer]				
	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$	$P_5$
$L_A$	0.783	0.783	0.783	0.783	0.783
$L_B$	0.717	1.211	1.211	1.211	1.211
$L_C$	0.717	1.231	1.754	1.754	1.754
$L_D$	0.717	1.231	1.832	2.177	2.177
$L_E$	0.717	1.231	1.832	2.351	2.854
$L_F$	0.717	1.231	1.832	2.351	2.858
<b>Totalt</b>	<b>4.367</b>	<b>6.919</b>	<b>9.246</b>	<b>10.627</b>	<b>11.637</b>

Tabell E77: Gjennomsnittlig avbruddsvarighet ( $r$ ) i lastpunkter

Tabell E78 viser årlig forventet avbruddsvarighet for hvert lastpunkt for gitt seksjoneringsmetodikk og seksjoneringsmetode. Her er feilsannsynligheten til kraftkablene benyttet til å beregne en forventningsverdi for avbruddsvarighet.

Lastpunkt	Årlig ventet avbruddsvarighet [timer/år]				
	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$	$P_5$
<b>Totalt</b>	0.1180	0.1739	0.2170	0.2395	0.2546

Tabell E78: Årlig forventet avbruddsvarighet i lastpunkter

Tabell E79 viser de forventede KILE-kostnadene for hvert lastpunkt gitt feilende kabelstrekning. Beløpene er avrundet til nærmeste hele krone.

Feilende Komp.	Forventet KILE [NOK]				
	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$	$P_5$
$L_A$	1203	1633	1908	2376	2651
$L_B$	787	1532	1788	2200	2456
$L_C$	562	1104	1569	1902	2123
$L_D$	450	883	1289	1728	1927
$L_E$	337	662	967	1359	1721
$L_F$	337	662	967	1359	1723
<b>Totalt</b>	<b>3676</b>	<b>6476</b>	<b>8488</b>	<b>10924</b>	<b>12601</b>

Tabell E79: Forventet KILE-kostnader i lastpunkter

Tabell E80 viser en oppsummering av ulike pålitelighetsindekser for gitt seksjoneringsmetodikk og seksjoneringsmetode.

Pålitelighetsindekser	
$P_{Avbrutt}$ [kW/år]	400.0
ILE [kWh/år]	501.5
SAIDI [min/år]	12.04
ASAI [-]	0.9999771
KILE [NOK/år]	42165 ,-

Tabell E80: Pålitelighetsindekser for gitt seksjoneringsmetodikk