

Vanntrevekst i bøyde XLPE-kabler

Forord

Eksperimentet utført om mekanisk belastede XLPE-kabler er en del av et større prosjekt ved NTNU/SINTEF Energiforskning AS.

Rapporten inneholder to deler, da den ene delen er videreføring av PhD Ståle Nordås sitt prosjekt, mens den andre delen er et eksperiment utført med andre forutsetninger. Begge delene omfatter analyse av samme type tripplekstrudert 12 kV XLPE-kabel. Del 1 er analyse av en kabel som har blitt aldret i vannbad påtrykt spenning i 7 måneder. Del 2 er analyse av to kabler som parallelt har blitt aldret i vannbad i 3 uker. Den ene med kun påtrykk av spenning, på tilsvarende måte som 7-måneders eksperimentet, som en referanse. Den andre med påtrykk av strøm i syklus samtidig med påtrykk av spenning.

Forfatteren vil utrykke sin takknemlighet for all hjelp fra veileder, prof. Erling Ildstad og PhD Ståle Nordås.

I tillegg vil forfatteren takke Bård Almås for all hjelp med installasjonen av det tekniske til oppsettet av eksperimentet. For øvrig rettes en takk til hjelpsomme ansatte på laboratoriet og elkraftverkstedet.

Sammendrag

Trippelstrudert 12 kV XLPE-kabel er brukt til studie for å studere effektene av mekanisk belastning og temperatursvingninger. Disse effektene er antatt å føre til akselerasjon av vanntrævekst.

Teoretiske beregninger ble gjort i forkant av eksperimentet. Det ble også gjennomført et dummyeksperiment som en test av utstyret og for å bestemme lengden av strømsyklusen og størrelsen på strømmen.

To kabler ble bøyd rundt rør med forskjellige diametre for å simulere mekanisk statisk belastning. Kablene ble plassert i vannbad og lederen ble fylt med vann. 24 kV 50 Hz AC-spenning ble påtrykt begge kablene for å starte aldringen. Den ene av kablene ble i tillegg utsatt for strømsykling med en strøm på 464 A.

Etter 3 ukers aldring ble kabelisolasjonen spiralisert, farget og analysert. For å studere effekten av den mekaniske belastningen ble hvert tverrsnitt av isolasjonen delt i to soner; en kompresjonssone og en strekksonen. I analysen ble antall vanntrær og størrelsen på de lengste vanntrærne i hver sone notert. Kabelen utsatt for strømsykling hadde høyere tetthet og lengre vanntrær enn kabelen aldret kun med spenning. Det var kun forekomst av ventilerte vanntrær ved ytre halvleder i kabelen med strømsykling, selv om det var svært få i antall. Effekten av den mekaniske belastningen viste seg å være redusert tetthet og lengde i kompresjonssonen og økt tetthet og lengde i strekksonen.

En 12 kV trippelstrudert XLPE-kabel aldret i 7 måneder med 24 kV ble også analysert. Verdiene ble sammenlignet med verdiene fra uttak, av tilsvarende kabel, med kortere aldringstid. Resultatet ble at tetthet og lengde av både ventilerte vanntrær og sløyfetrær øker med aldringstiden.

Innholdsfortegnelse

1. Innledning.....	1
1.1 Motivasjon.....	1
1.2 Hypotese.....	1
2. Design av eksperimentet	3
2.1 Forberedelser	3
2.1.1 Kalkuleringer.....	3
2.1.2 Dummyeksperiment	4
3. Målemetoder og utstyr	6
4. Resultater.....	9
5. Diskusjon.....	16
6. Konklusjon	21
7. Referanser.....	22
Vedlegg 1	I
Vedlegg 2	III

1. Innledning

1.1 Motivasjon

Polymerisolerte strømkabler er i den seneste tid blitt veldig aktuell i lys av offshoreindustri. Pilotprosjekter for flytende offshore vindmøller er startet og det planlegges flere vindparker bestående av flytende vindturbiner i Norge. I tillegg brukes flytende oljeplattformer langs kysten til produksjon av olje. Vindparkene er avhengig av kraftkabler for å distribuere energi til strømnettet på land, mens flyterne er avhengig av strømforsyning (1).

Det er kjent at hos polymerisolerte kraftkabler er vanntrevekst en vanlig aldringsmekanisme. Vanntrevekst kan forekomme både med og uten ytre påvirkninger. Ytre påvirkninger vil belaste kabler som er koblet til flytende elementer på havoverflaten. Det er reist spørsmål om mekanisk belastning, statisk og i hovedsak dynamisk, vil påvirke aldringen av kabelen i form av økt akselerasjon i vanntrevekst. Denne rapporten beskriver studier som er gjort for å se nærmere på problematikken rundt mekanisk statisk belastede kabler.

Mekanisk statisk belastning av kabler kan forekomme der kablene må bøyes til ved installasjon, for eksempel enten for å treffe inngangen på en kabelskinne eller i overgangen fra vertikal til horisontal montering. En kabel som påvirkes av bølger vil bli utsatt for strekk med en gitt frekvens, mekanisk dynamisk belastning. Statisk belastning kan ses på som dynamisk belastning der frekvensen er lik null. Mekanisk statisk belastning har i så måte ikke spesiell tilknytning til flytende elementer på havoverflaten, men mekanisk statisk belastning kan likevel ses i lys av mekanisk dynamisk belastning. I en kabel aldret med mekanisk statisk belastning er man interessert i å finne virkningen av påkjenningen, og strekk- og kompresjonssonene kan studeres og analyseres med hensyn til tetthet og lengde av vanntrær.

1.2 Hypotese

Tidligere er det gjort forsøk med mekanisk statisk belastning, jf. Nordås' prosjekt. Nordås og Ildstad skriver at det vil forekomme færre og kortere vanntrær i isolasjonen utsatt for kompresjonskrefter. Mens det i strekksone vil det være flere og lengre vanntrær. Det ble også hevdet at ventilerte trær vil i hovedsak initieres ved indre halvleder (2).

Det er kjent fra tidligere eksperimenter at en måte å redusere sprekkdannelse i isolasjon på er å utsette isolasjonen for kompresjonsbelastning (3).

Det er kjent fra tidligere at det er sammenheng mellom vanntrevekst og temperatur. Vanntrær vokser raskere med vann i varm leder, og vann i lederen kombinert med temperaturgradient i isolasjonen fører til oppsamling av kondensert vann i hulrom som igjen fører til drastisk økning i tetthet, størrelse og vekstrate for sløyfetrær (4).

Siden dette eksperimentet er en sammensetning av mekanisk statisk belastning og temperatursykling med temperaturgradient forventes det færre og kortere trær i kompresjonssonen, samtidig som det for kabelen med temperaturgradient vil være lengre og

flere sløyfetrær. Det kan også forventes at antall ventilerte trær på ytre halvleder kun vil utgjøre få prosent av det totale antallet ventilerte trær.

2. Design av eksperimentet

2.1 Forberedelser

Når en kabel belastes med strøm utvikler resistansen og strømmen i lederen effekt i form av varme. Teorien om termisk resistans tilsier at temperaturen vil avta gjennom isolasjonen radielt ut fra lederen. Med ønske om å bestemme temperaturgradienten fra lederen til utsiden av ytre halvleder ble det utført kalkuleringer og et dummyeksperiment.

2.1.1 Kalkuleringer

Den termiske resistansen ble beregnet med formler fra (5)(kap.4.3) og (6). Temperaturen på vannet kunne bestemmes av en temperaturstyrt bryter. Temperaturen på vannet ble bestemt til å være 30 °C.

Den termiske resistansen til isolasjonen ble beregnet til:

$$T_1 = \frac{\rho_T}{2\pi} \ln \frac{d_o}{d_c} = \frac{3,5}{2\pi} \ln \frac{21,2}{11,2} = 0,36 \text{ Km/W}$$

Det var ønskelig å få en temperaturgradient på 15 °C. Med det som utgangspunkt kunne effekten som kreves for å gi denne gradienten beregnes:

$$P = \frac{\Delta\theta}{T} = \frac{15 \text{ K}}{0,36 \text{ Km/W}} = 42 \text{ W/m}$$

Resistansen i et metall avhenger av temperaturen på metallet. Et EXCEL-regneark basert på formler fra IEC-standard (7) ble brukt til å beregne resistansen ved 30 °C. Formlene regnearket er basert på er vedlagt i vedlegg 1. Resistansen i kobberlederen ble 0,2011 Ω/km. Strømmen som må påtrykkes for å gi ønsket temperaturgradient ble dermed:

$$I = \sqrt{\frac{42 \text{ W/m}}{0,2 \cdot 10^{-3} \Omega/\text{m}}} = 458 \text{ A}$$

Vannbadet skulle i utgangspunktet varmes opp til 30 °C med varmekabler, styrt av en temperaturbryter. Testobjektet, kabelen, vil i seg selv avgi varme ved påtrykk av strøm. Til eksperimentet var det planlagt å bruke 12 meter kabel. Det tilsvarer en total effekt avgitt av kabelen på 504 W. En bekymring ble derfor om kabelen ville varme opp vannet til uønskede høye verdier. Ved å se på hvor mye energi som kreves for å varme opp vannet en gitt temperaturdifferanse, kunne man regne seg frem til en passende syklus for strømmen som ikke varmet opp vannet for mye.

Volumet av tanken ble beregnet til 408 000 liter. Vannets spesifikke varmekapasitet, C_j , er 4,18 J/(gram*°C). Energi som kreves for å varme vannet 15 grader:

$$E = \frac{V \cdot C_j \cdot \Delta T}{t} = 7,10 \text{ kWh}$$

Tiden det tar å varme vannet 15 grader med kabelen blir dermed 14 timer. Tabell 1 gir oversikt over hvilke temperaturendringer forskjellig brukstid gir. Resultatene gir en indikasjon på hvilken brukstid som gir akseptabel temperaturendring. Alle verdiene er beregnet med 504 W, som er det kabelen gir ved påtrykk av 458 A.

Brukstid [timer]	3	6	8	12
ΔT , temp.endring [K]	3,19	6,38	8,51	12,77

Tabell 1: Oversikt over brukstid av strøm og temperaturendring

2.1.2 Dummyeksperiment

Før hovedeksperimentet ble igangsatt ble et dummyeksperiment iverksatt for å sjekke om de teoretisk beregnede verdiene stemte i praksis. Hovedhensikten var å finne hvilken strøm som ville gi en temperaturgradient på 15 grader. Dummyforsøket ble gjennomført også for å være sikker på at kretsen ville fungere som den skulle uten å ødelegge hovedtestobjektene, og for å finne ut tiden det tar før temperaturen ble stabil både med og uten strøm gjennom lederen.

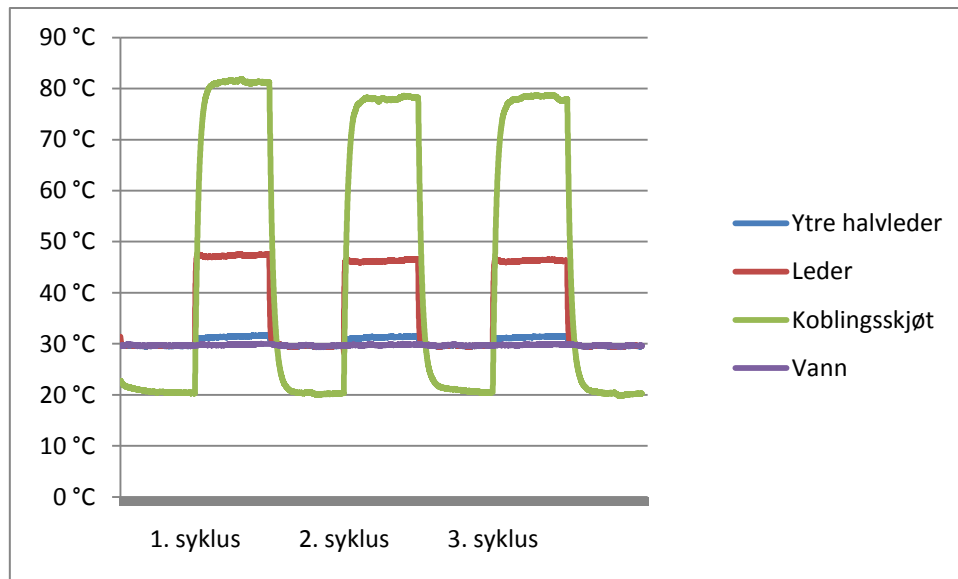
Dummyeksperimentet ble utført med en 2 meter lang kabel. Kabelen ble kun påtrykt strøm. Fire temperatursensorer ble festet til kabelen, hhv. i koblingsskjøten mellom testobjektet og kabelen gjennom split-core-transformatoren, på ytre halvleder, og to på hvert sitt sted i lederen. En femte sensor ble plassert i vannet, for å måle omgivelsestemperaturen.

Under forsøket ble temperaturen logget av en datalogger. Testen ble først gjennomført med 400 A, 458 A og 500 A, for så å justere strømmen slik at temperaturdifferansen ble 15 grader. Tabell 2 viser målte og teoretiske verdier. R_{ac} ble beregnet teoretisk i regnearket med formler fra vedlegg 1. Resistansen er temperaturavhengig, og i dette tilfellet ble målt ledertemperatur brukt til beregning av de teoretiske verdiene.

Teststrøm	Målt temp. i leder [°C]	Beregnet $R_{ac}(T)$ [Ω/km]	Målt temp. på ytre halvleder [°C]	Praktisk temp.gradient [K]	Teoretisk temp.gradient [K]
400 A	41,35	0,2094	31,52	9,83	12,06
458 A	45,12	0,2125	31,77	13,35	16,05
500 A	48,08	0,2148	31,44	16,64	19,33

Tabell 2: Tabell for sammenligning av kalkulerte og målte verdier

Loggingen viste at temperaturen steg raskt og stabiliserte seg etter drøyt en time med strømpåkjenning. Fra strømmen ble brutt til stabile temperaturforhold tok under to timer. Dette og de teoretisk beregnede temperaturendringene i Tabell 1 var utgangspunktet for valg av tidsintervall for strømsyklusen. Det ble avgjort å teste med intervall med 6 timer. Figuren under viser hvordan temperaturen endret seg med tiden.



Figur 1: Temperaturforløp under strømsykling

Figur 1 viser at intervall med 6 timer gir nok tid til stabile temperaturforhold. For å avgjøre hvilken strøm som i praksis gav temperaturgradient lik 15 grader ble strømverdien endret underveis i syklusen. Det er årsaken til at plottene har forskjellig form. Tabell 3 viser strømverdi og korresponderende temperaturgradient. Maksimal verdi for temperatur i leder og ytre halvleder er brukt til å beregne temperaturgradienten.

Strøm [A]	500	479	464
Temp.gradient [K]	16,21	15,38	15,28

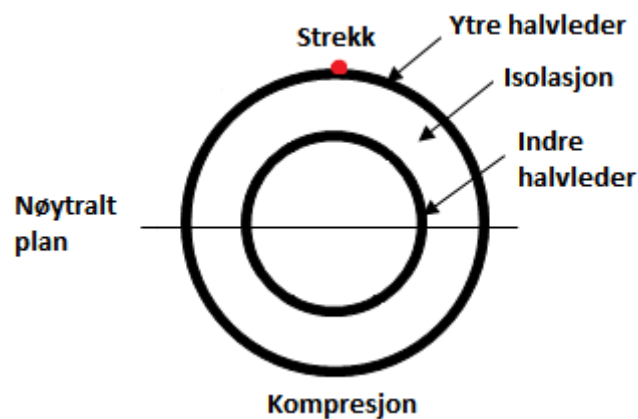
Tabell 3: Målt temperaturgradient

Ut fra resultatet i tabellen ble det besluttet å benytte 464 A i hovedeksperimentet.

3. Målemetoder og utstyr

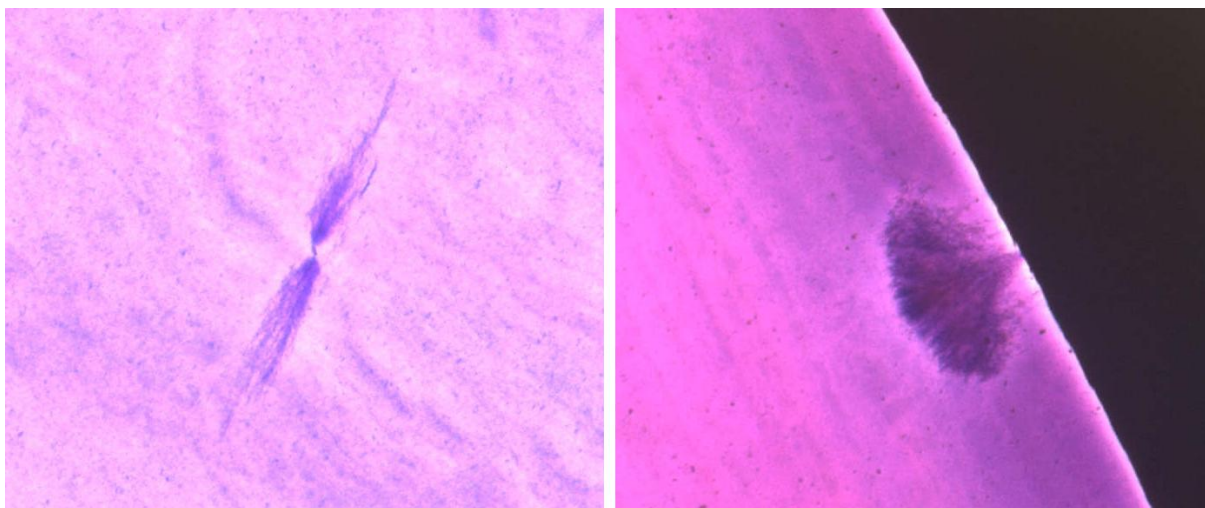
Før aldringen startet ble kablene bøyd rundt rør med diametre 5, 10, 20 og 30 cm. Mellom rørene var det partier der kabelen var helt rett.

Et av målene med eksperimentet var å studere forskjellen i vanntrevekst i strekk- og kompresjonssonen av kabelisolasjonen. Et snitt av kabelisolasjonen ble delt i to soner slik Figur 2 viser; en strekksone og en kompresjonssone. Skillet mellom sonene vil være feltet der det verken er strekk eller kompresjon. Dette er en forenkling av det som er blitt gjort i forhold til tidligere eksperimenter ((3), (2)) der hvert snitt ble delt i seks soner. Disse forsøkene ble gjort for å finne sammenheng mellom størrelsen av påtrykte krefter og vanntrevekst, hvilket ikke er aktuelt i dette eksperimentet.



Figur 2: Soneinndelingen av isolasjonssnitt

Det skilles mellom to typer vanntreer; sløyfetrær (bow-tie trees) og ventilerte trær (vented trees). Sløyfetrær vokser inne i isolasjonen, symmetrisk i det elektriske feltets retning, ut fra forurensninger, hulrom eller andre skader i isolasjonen. Ventilerte trær kjennetegnes ved at de vokser fra grenseflaten mellom isolasjonen og halvledermaterialet, også disse vokser i det elektriske feltets retning (8). Figur 3 er bilder tatt gjennom mikroskop, og viser typiske eksempler på utseende av de to typene vanntreer som eksisterer. Et sløyfetre er avbildet til venstre og et ventilert tre er avbildet til høyre.



Figur 3: Bilde av vanntrær. Sløyfetre til venstre og ventilert tre ved ytre halvleder til høyre.

Ventilerte trær er sett på som mest problematisk i forhold til aldring av kabler, fordi vekstraten er lineær, og vil over tid vokse seg nesten eller helt gjennom isolasjonen. Veksten av sløyfetrærne er rask, men raten avtar med tiden og flater etter hvert helt ut (8).

For hver sone ble type vanntrær, antall trær og lengden av det lengste treet notert, med unntak i analysen av del 1, der kun det lengste av trærne i begge sonene ble notert. For å markere sonene ble det laget et snitt langs kabelen der strekket var størst (markert med rødt i Figur 2). For de ubøyde delene av kabelen ble snittet der kabelen ville hatt størst strekk dersom den hadde vært bøydd. Ingen av kablene var vridd rundt sin egen akse slik at snittene fulgte samme orientering i isolasjonen.

Lederen ble fylt med vann og kablene ble plassert i et vannkar ved 30 °C. For å sikre at lederen var helt fylt med vann, ble vannet fylt på i en ende plassert høyere enn motsatt ende, helt til vannet rant igjennom. Vann i lederkanalen sørger for at diffundering av vann går raskere i delene av isolasjonen nærmest lederen (4). Deretter ble 50 Hz AC-spenning på 24 kV påtrykt kablene for å starte aldringen.

Den ene av kablene som skulle lede strøm dannet en sløyfe som gikk gjennom en split-core-transformator. Så lenge det gikk strøm til transformatoren gikk det strøm i testobjektet. Strømmen gjennom testkabelen kunne stilles høy pga. vindingsforholdet i transformatoren. Strømsyklusen kunne enkelt styres ved å koble transformatoren inn og ut. Strømmen bidrar til oppvarming av isolasjonen slik at isolasjonen nærmest lederen får høyere temperatur enn isolasjonen lengst fra lederen. Når strømmen i transformatoren skrur av og isolasjonen kjøles ned, vil isolasjonen nærmest lederen bli overmettet av vann. Overmetningen fører til raskere vekst av vanntrær (4).

Under hele aldringstiden ble temperaturen på vannet (omgivelsene) og ytre halvleder logget. Dette for å kunne sjekke omtrentlig verdi på temperaturgradienten i etterkant og også for å finne ut om beregnede verdier stemmer i praksis.

Etter aldring ble kabelisolasjonen spiralisert og farget med metylenblått i henhold til CIGRE. For at vanntrær skal bli synlig, må isolasjonen farges. Vanntrærne blir synlige ved at de får en sterkere farge enn resten av isolasjonen.

Selve analysen ble utført i mikroskop. Analysen ble utført forskjellig i de to delene. Analysen av del 1, som var en fortsettelse av Ståle Nordås' forsøk, ble utført i et mikroskop tilsvarende det som ble brukt i hans analyse. Denne typen mikroskop har ikke mulighet til å måle lengden av vanntrærne. En forstørrelse på 25x ble brukt til detektering av vanntrærne.

Detekteringsgrensen var ca. 40 μm . Lengden ble målt med et annet mikroskop koblet til en datamaskin, hvor lengden kunne måles vha. et måleverktøy på datamaskinen.

I del 2 ble det brukt et stereomikroskop til å analysere kabelsnittene. Øyelinsen i dette mikroskopet har en måleskala, slik at lengden av vanntrærne kan måles. 25x forstørrelse ble brukt til detektering av sløyfetrær. Dersom kun ventilerte trær skulle detekteres, ble det brukt forstørrelse på 12x. Detekteringsgrensen var ca. 40 μm .

Maksimal vanntre lengde vil variere fra snitt til snitt. Ekstremalverdistatistikk er en måte å framstille maksimal vanntre lengde på. Ved å kjenne l_{max} i hvert snitt kan en bruke sannsynlighetsfordeling og beregne sannsynligheten for å finne trær mindre enn l_{max} (9) og plote grafer på et ekstremalverdipapir. Sannsynligheten beregnes med følgende formel, ref (8):

$$P = \frac{n_0 - 0,3}{n + 0,4}$$

For at verdiene skal være statistisk pålitelige må hvert snitt inneholde minimum ti vanntrær.

4. Resultater

Del 1

Analysen av en tripplekstrudert 12 kV XLPE-kabel aldret i 7 måneder gav resultater gjengitt i tabellene nedenfor. Under aldringen var kabelens ytre og indre halvleder i kontakt med vann. Til sammen ble to uttak med forskjellig statisk belastning analysert, henholdsvis bøyediameter på 5 cm og 30 cm. Oversikt over analysert kabelisolasjonslengde er gitt i Tabell 4.

Case	Type vanntre	Lengde analysert [mm]
Bøyediameter = 5 cm	Ventilert	60
	Sløyfe	18,4
Bøyediameter = 30 cm	Ventilert	80
	Sløyfe	12

Tabell 4: Analysert isolasjonslengde i del 1

Tabell 5 viser resultat med hensyn til antall vanntrær, tetthet, maksimal lengde og gjennomsnittlig maksimal lengde på vanntrærne i isolasjonen utsatt for høyest stress, dvs. bøyediameter på 5 cm.

Bøyediameter = 5 cm	Sone	Ventilerte trær		Sløyfetrær
		Indre halvleder	Ytre halvleder	
Antall	Strekk	53	4	224
	Kompresjon	34	2	167
Tetthet [trær/cm]	Strekk	8,83	0,67	121,74
	Kompresjon	5,67	0,33	90,76
l_{\max} [μm]	Strekk	363	285	219
	Kompresjon	334	153	176
$l_{\max, \text{gj.snitt}}$ [μm]	Begge	153		106

Tabell 5: Resultat av analyse for 5 cm bøyediameter

Tabell 6 viser resultat med hensyn til antall vanntrær, tetthet, maksimal lengde og gjennomsnittlig maksimal lengde på vanntrærne i isolasjonen utsatt for lavest stress, dvs. bøyediameter på 30 cm.

Bøyediameter = 30 cm	Sone	Ventilerte trær		Sløyfetrær
		Indre halvleder	Ytre halvleder	
Antall	Strekk	33	3	104
	Kompresjon	10	3	50
Tetthet [trær/cm]	Strekk	4,13	0,38	86,67
	Kompresjon	1,25	0,38	41,67
l_{\max} [μm]	Strekk	442	423	214
	Kompresjon	303	114	162
$l_{\max, \text{gj.snitt}}$ [μm]	Begge	198		112

Tabell 6: Resultat av analyse for 30 cm bøyediameter

Del 2

Slik det tidligere er beskrevet ble to trippелеkstruderte 12 kV XLPE-kabler aldret parallelt i 3 uker. Under aldringen hadde både ytre og indre halvleder direkte kontakt med vann.

Tidsbegrensninger gjorde at kun to uttak fra hver kabel ble analysert, henholdsvis ubøyd kabel og kabel med bøylediameter på 5 cm, til sammen fire caser:

Case 1a: Strømsykling, ubøyd kabel

Case 1b: Strømsykling, 5 cm bøylediameter

Case 2a: Uten strømsykling, ubøyd kabel

Case 2b: Uten strømsykling, 5 cm bøylediameter

Analysen ble analysert med mål om å få nok verdier til plott på ekstremalverdipapir. Antallet snitt analysert for hver case ble dermed forskjellig. Tabell 7 gir oversikt over analysert kabelisolasjonslengde.

Case	Type vanntre	Lengde analysert [mm]
1a	Ventilert	94,5
	Sløyfe	7
1b	Ventilert	84
	Sløyfe	10,5
2a	Ventilert	35
	Sløyfe	14
2b	Ventilert	35
	Sløyfe	10,5

Tabell 7: Analysert isolasjonslengde i del 2

Tabell 8 og Tabell 9 gjengir resultatene fra analysen med hensyn til antall vanntreer, tetthet, maksimal lengde og gjennomsnittlig maksimal lengde på vanntreerne i isolasjonen utsatt for temperaturendringer, case 1.

Case 1a	Sone	Ventilerte trær		Sløyfetrær
		Indre halvleder	Ytre halvleder	
Antall	Strekk	55	1	155
	Kompresjon	63	2	138
Tetthet [trær/cm]	Strekk	5,82	0,106	221,43
	Kompresjon	6,67	0,21	197,14
l_{\max} [μm]	Strekk	242	157	242
	Kompresjon	273	136	242
$l_{\max, \text{gj.snitt}}$ [μm]	Strekk	159		146
	Kompresjon	174		123

Tabell 8: Resultat av analyse for case 1a

Case 1b	Sone	Ventilerte trær		Sløyfetrær
		Indre halvleder	Ytre halvleder	
Antall	Strekk	47	4	197
	Kompresjon	5	3	160
Tetthet [trær/cm]	Strekk	5,60	0,48	187,62
	Kompresjon	0,60	0,36	152,38
l_{\max} [μm]	Strekk	348	76	348
	Kompresjon	257	152	303
$l_{\max, \text{gj.snitt}}$ [μm]	Strekk	179		199
	Kompresjon	139		140

Tabell 9: Resultat av analyse for case 1b

Tabell 10 og Tabell 11 gjengir resultatene fra analysen med hensyn til antall vanntrær, tetthet, maksimal lengde og gjennomsnittlig maksimal lengde på vanntrærne i isolasjonen fra aldring kun med spenning, case 2.

Case 2a	Sone	Ventilerte trær		Sløyfetrær
		Indre halvleder	Ytre halvleder	
Antall	Strekk	7	0	73
	Kompresjon	5	0	95
Tetthet [trær/cm]	Strekk	2,00	0	52,14
	Kompresjon	1,43	0	67,88
l_{\max} [μm]	Strekk	242	n/a	121
	Kompresjon	166	n/a	121
$l_{\max, \text{gj.snitt}}$ [μm]	Strekk	136		69
	Kompresjon	118		74

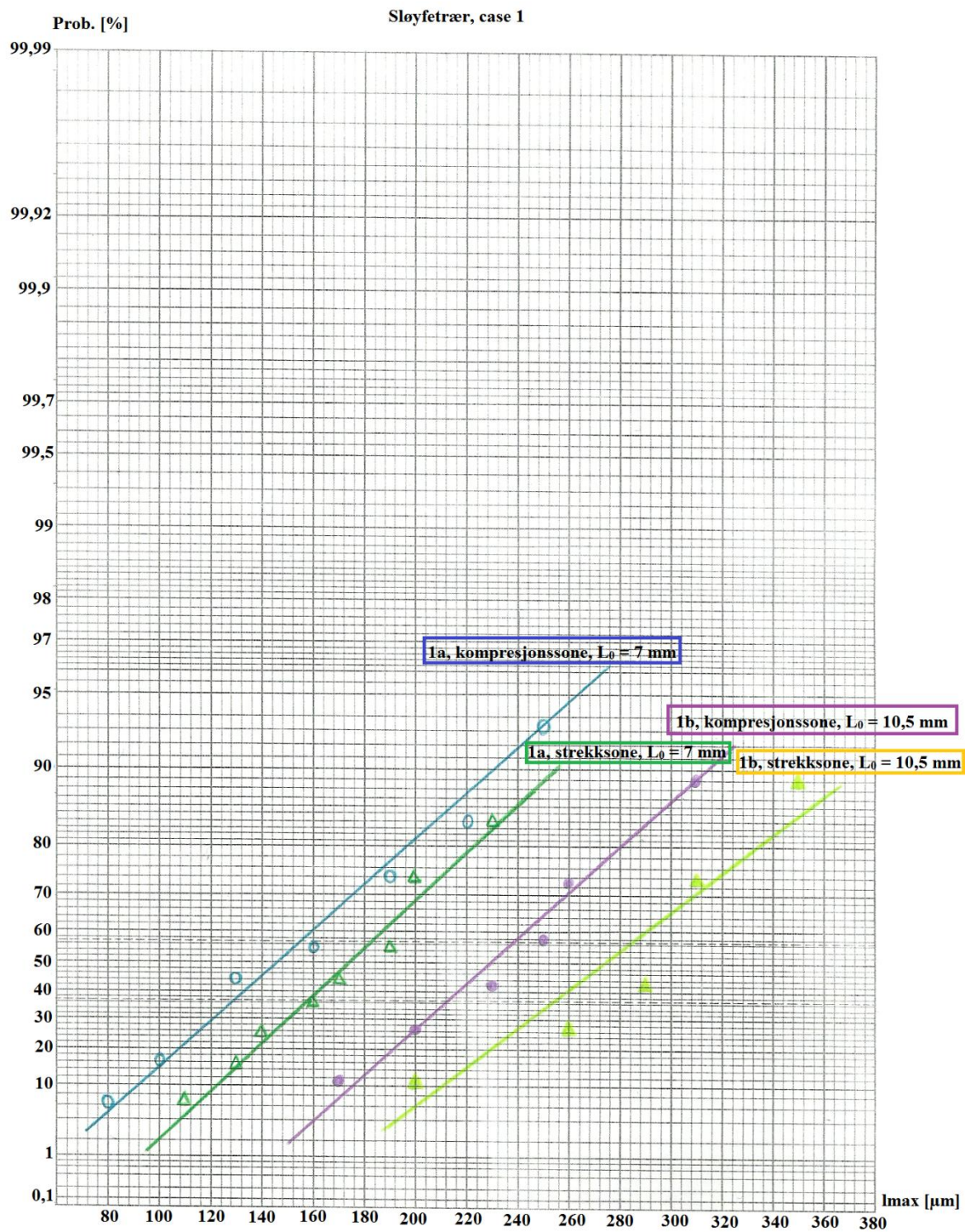
Tabell 10: Resultat av analyse for case 2a

Case 2b	Sone	Ventilerte trær		Sløyfetrær
		Indre halvleder	Ytre halvleder	
Antall	Strekk	7	0	89
	Kompresjon	4	0	43
Tetthet [trær/cm]	Strekk	2	0	84,76
	Kompresjon	1,14	0	40,95
l_{\max} [μm]	Strekk	303	n/a	333
	Kompresjon	273	n/a	106
$l_{\max, \text{gj.snitt}}$ [μm]	Strekk	219		110
	Kompresjon	167		72

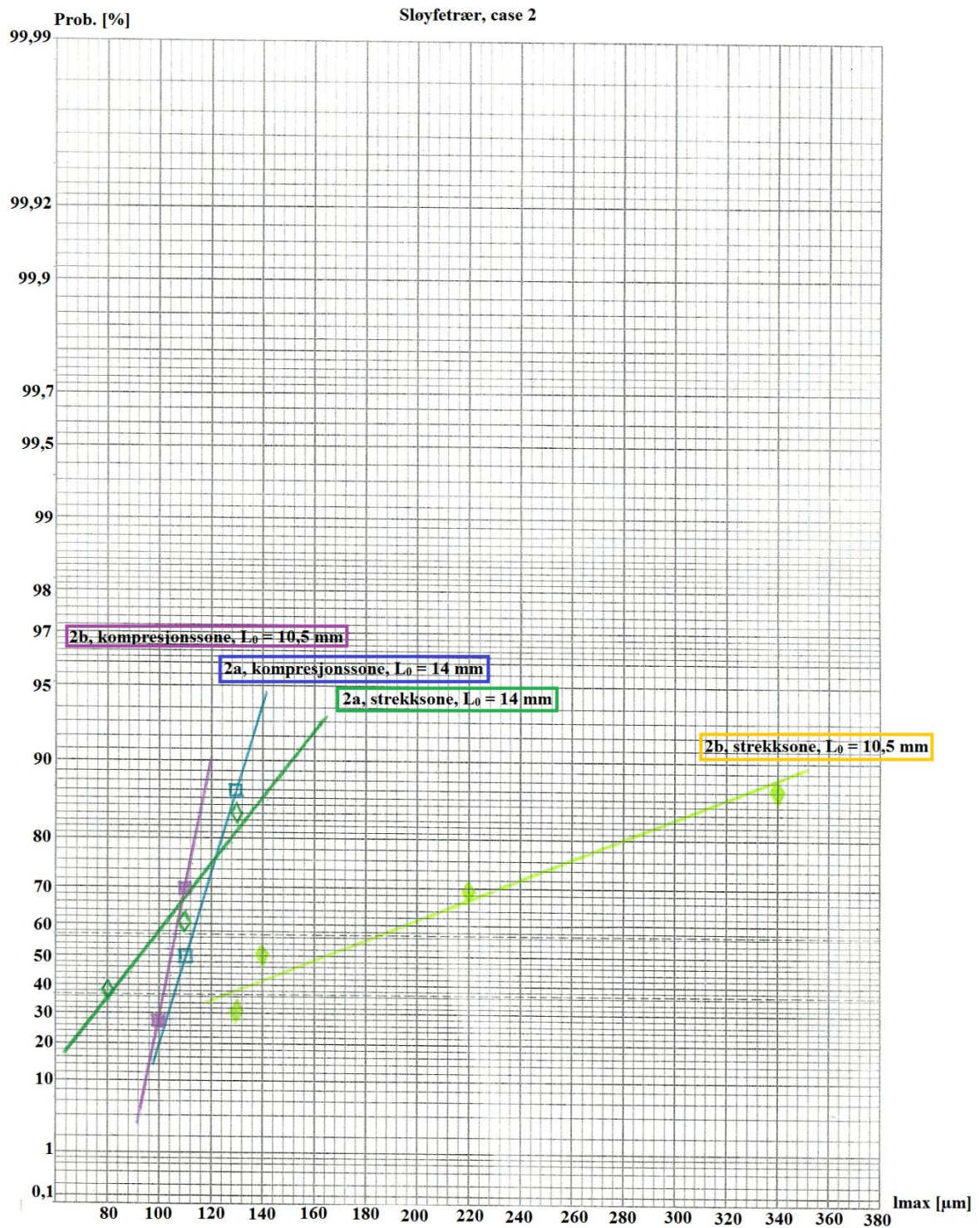
Tabell 11: Resultat av analyse for case 2b

Fordelingen av sannsynligheten for maksimal vanntrælengde, l_{\max} , per snitt ble plottet på ekstremalverdipapir. For statistisk pålitelighet kreves det minimum ti trær per snitt. Grunnet lav tetthet av trær har flere snitt < 0,35 mm dannet et ”nytt” tykkere snitt. For lav tetthet av ventilerte trær i kompresjonssonen i case 1b, og generelt lav tetthet av ventilerte trær i case 2a og 2b gjorde de statistiske verdiene for upålitelige til å kunne plottes.

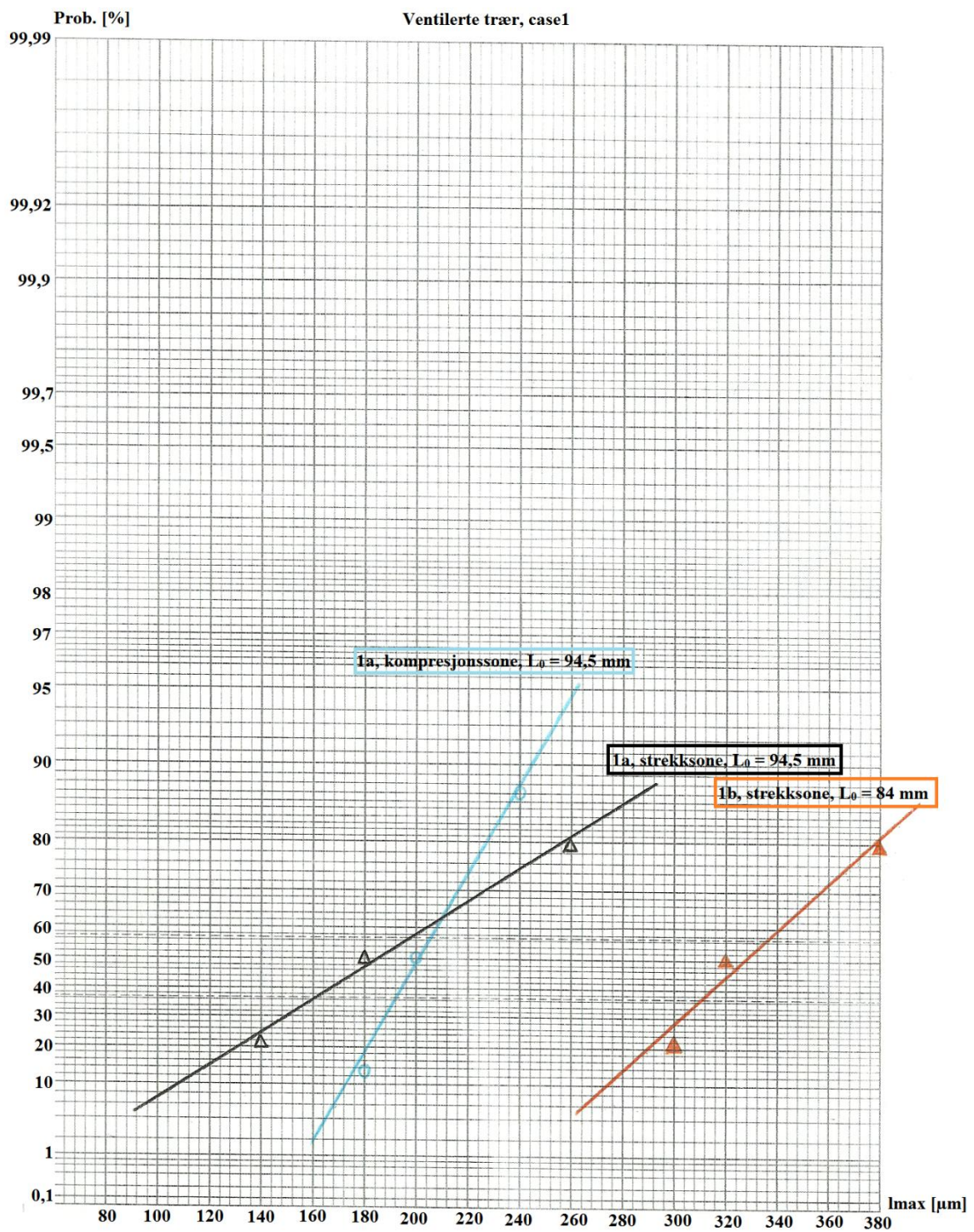
Plottene vises i Figur 4, Figur 5 og Figur 6. L_0 indikerer isolasjonslengden som ble analysert.



Figur 4: Kumulativ sannsynlighetsfordeling av maksimal sløyfetrengde per snitt i kabelen aldret med strømsykling



Figur 5: Kumulativ sannsynlighetsfordeling av maksimal sløyfetrengde per snitt i kabelen aldret uten strømsykling



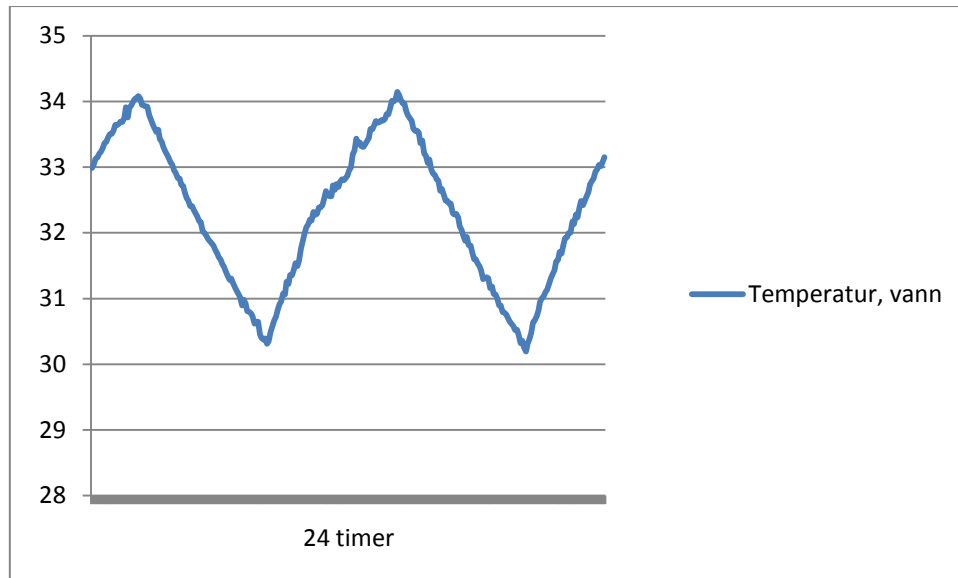
Figur 6: Kumulativ sannsynlighetsfordeling av maksimal
lengde for ventilert tre per snitt i kabelen aldret med strømsykling

Temperaturovervåkning

Verdiene fra temperaturloggingen under hovedeksperimentet er plottet i grafer og ligger vedlagt i vedlegg 2. Den røde stripa indikerer gjennomsnittstemperaturen $32,56\text{ }^{\circ}\text{C}$ på vannet. Den blå stripa indikerer gjennomsnittstemperaturen $33,58\text{ }^{\circ}\text{C}$ på ytre halvleder. Laveste og høyeste verdi på temperaturen i vannet var henholdsvis $35,23\text{ }^{\circ}\text{C}$ og $29,56\text{ }^{\circ}\text{C}$. På ytre halvleder var laveste og høyeste temperatur målt til henholdsvis $37,32\text{ }^{\circ}\text{C}$ og $29,64\text{ }^{\circ}\text{C}$.

5. Diskusjon

For å dokumentere temperaturforløpet ble temperaturen på vannet og ytre halvleder logget under hele hovedeksperimentet. Figur 7 viser temperaturen på vannet i løpet av et tilfeldig valgt døgn.



Figur 7: Vanntemperatur i løpet av et døgn

Figuren er kun et lite eksempel på temperaturloggingen, men gir et godt bilde av hvordan temperaturen var generelt sett.

Formen på kurven viser at temperaturen ikke har flatet ut og stabilisert seg, slik den gjorde i dummyeksperimentet (Figur 1). I dummyeksperimentet hadde dessuten vannet liten temperaturvariasjon og effekten av den 2 m lange kabelen virket å ha liten innvirkning på vanntemperaturen. Effekten av at kabelen var vesentlig lenger i hovedeksperimentet antas å være årsaken til kraftigere temperatursvingninger. Fordi maksimumstemperaturen var større tok det lenger tid å stabilisere temperaturen. Høyere maksimumstemperatur førte til at avkjølingen også tok lengre tid. Generelt falt temperaturen sjelden under 30 °C, slik det var planlagt at den egentlig skulle.

Beregningene i Tabell 1 tilser at en brukstid med strøm på seks timer ville gi vannet en temperaturendring på 6,38 °C. Grafen over gir en temperaturendring på ca. 4 °C, men temperaturen har som nevnt over ikke rukket å stabilisere seg, så hva den praktiske verdien blir er usikkert, men den antas å være større enn 4 grader, i og med at stigningen ikke avtar før strømmen skrur av.

Å øke temperaturen på vannet fra 30 °C til for eksempel 50 °C ville hindret kabelen å påvirke vanntemperaturen. Med 50 grader måtte varmekablene stått for oppvarmingen, kabelen i seg selv ville bidratt, men temperaturen ville sannsynligvis ikke blitt større enn 50 °C noen gang.

Grunnen til at temperaturen ble satt til akkurat 30 °C var for å få like forhold som i Ståle Nordås' eksperiment.

Ytre halvleder holdt generelt et par grader mer enn vannet, men temperaturforløpene har lik form.

Før eksperimentet ble satt i gang var det mye fokus på temperaturgradienten, og det å få den til å bli 15 grader. Akkurat verdien ble valgt fordi den virket fornuftig og ikke fordi akkurat 15 grader har blitt brukt i tidligere eksperimenter. At fokuset var såpass på akkurat verdien var nok ikke nødvendig. Om gradienten hadde vært 10 eller 17 grader ville utgjort liten forskjell med tanke på vanntrevekst. Grunnen til at mye av fokuset ble på selve verdien av gradienten var for å undersøke om teoretiske beregnede verdier stemte med praktiske verdier.

I dummyforsøket var det enkelt å holde oversikten over temperaturgradienten i og med at temperaturen også ble logget i lederen. Temperaturlogging av lederen var ikke gjennomførbart så lenge kabelen var påtrykt spenning, og ledertemperaturen kunne derfor ikke logges under hovedeksperimentet. Derfor er det litt usikkerhet rundt verdien på temperaturgradienten under hovedeksperimentet, særlig fordi vannet også hadde temperaturendringer. Men den eneste faktoren som er avhengig av temperatur i beregningen av gradienten er resistansen, R_{ac} . Variasjonen i R_{ac} er liten ved små temperaturendringer (se Tabell 2), slik at det er rimelig å anta at temperaturgradienten var omtrent 15 grader, med en strøm på 464 A, selv om omgivelsestemperaturen (vannet) var noe høyere enn i dummyeksperimentet.

Tabell 2 viser en forskjell mellom teoretisk og praktisk verdi av temperaturgradienten mellom 2,23 til 2,7 grader. Det vurderes som god overensstemmelse mellom teoretiske og praktiske verdier.

Da strømmen ble beregnet i forberedelsene ble det i kalkuleringene brukt en resistans som tilsa at lederen hadde en temperatur på 30 °C, men i praksis gav en strøm på 458 A en høyere ledertemperatur. Derfor er temperaturgradienten beregnet i Tabell 2, 16 grader og ikke 15 grader.

Generelt for begge delene av analysen kan en si at 5 cm bøylediameter er ekstremt og kanskje ikke realistisk i praktisk sammenheng, men testes for å se resultater ved ekstreme tilfeller av belastning.

Del 1

Tabell 12 er basert på tabell 1 i Nordås og Ildstads avhandling (2), men er omregnet til tetthet av trær for bedre sammenligningsgrunnlag, og er utvidet med verdiene fra analysen av aldringen etter 7 måneder.

Bøylediameter [cm]	Aldringstid [uker]	Tetthet av ventilerte trær ved indre halvleder i hver sone [trær/cm]	
		Strekksone	Kompresjonssone
5	3	3,75	1,15
	9	3,55	1,05
	28	8,83	5,67
30	3	2,80	1,95
	9	3,65	2,35
	28	4,13	1,25

Tabell 12: Variasjon i tetthet av ventilerte trær i kabel med forskjellige bøylediametre over tid

Det en kan tolke fra tabellen over er at tettheten av vanntrær øker med økende aldringstid, med unntak av tettheten av trær etter 28 uker for kabelen med 30 cm bøyeradius. 1,25 trær per centimeter er lavere enn hva som ble funnet i kabelen etter bare 3 uker. Årsaken til det kan være for eksempel unøyaktighet i analysen, analyse av for kort lengde av isolasjon eller at det var flere initieringspunkter i 3-ukerskabelen.

Figur 2b i (10) av Faremo med flere, viser økt tetthet av ventilerte vanntrær som funksjon av aldringstiden. Resultatene i Tabell 12 bekrefter dette.

I analysen av del 1 ble kun det lengste treet i hvert snitt målt. Dermed ble det ”huller” i resultatene slik at plotting på ekstremalverdipapir ikke ble mulig. Dette ble derfor forbedret til analysen av del 2 slik at maksimal lengde ble målt i begge sonene i samme snitt.

Selve analysen ble foretatt av to bøylediametre, hhv. 5 og 30 cm. Ideelt sett burde en rett kabel også blitt undersøkt ettersom det er en god referanse, men tiden ble en begrensning da analysen er tidkrevende.

Tabell 13 er til sammenligning av maksimal ventilert vannrelengde ved forskjellig tid og mellom dette eksperimentet og Nordås’ eksperiment.

	Bøylediameter [cm]	Maksimal lengde av ventilerte vanntrær på indre halvleder, l_{\max} [μm]	
		Strekksone	Kompresjonssone
Resultater fra Nordås’ eksperiment 3 uker	5	295	264
	30	233	233
	∞	233	225
Resultater fra dette eksperimentet 3 uker (case 2)	5	303	273
	30	n/a	n/a
	∞	242	166
28 uker	5	363	334
	30	442	303
	∞	n/a	n/a

Tabell 13: Oversikt over maksimal lengde av ventilerte trær

Resultatene fra begge eksperimentene etter 3 ukers aldring samsvarer godt. Etter 28 uker (7 mnd) er lengden på vanntrærne større enn etter 3 uker. At maksimal lengde øker med økt aldringstid bekrefter (10).

Del 2

Siden rett kabel fungerer bra som referanse for bøyd kabel, ble rett kabel analysert i del 2 i motsetning til del 1. Kabel med 30 cm bøyediameter var gjort klart til analyse, men analysen ble ikke gjennomført pga. mangel på tid.

Tettheten av vanntrær per centimeter kabel for de forskjellige casene vises i Tabell 14

Case	Sone	Tetthet av ventilerte trær [trær/cm]		Tetthet av sløyfetrær [trær/cm]
		Indre halvleder	Ytre halvleder	
1a	Strekk	5,82	0,11	221,43
	Kompresjon	6,67	0,21	197,14
2a	Strekk	2,00	0	52,14
	Kompresjon	1,43	0	67,88
1b	Strekk	5,60	0,48	187,62
	Kompresjon	0,60	0,36	152,38
2b	Strekk	2	0	84,76
	Kompresjon	1,14	0	40,95

Tabell 14: Variasjon i tetthet av vanntrær i forskjellige caser

Tabell 14 viser tydelig forskjell i tettheten av vanntrær i kabel med og uten strømsykling. Det er vesentlig flere trær, av begge typene, i kabelen med strømsykling slik det ble antatt ut fra (4). Tettheten av ventilerte trær på indre halvleder er redusert 91 % i case 1b i forhold til tettheten i den rette kabelen, case 1a. Det stemmer overens med innholdet i (2) og (3). I (2) står det skrevet at flere trær vokste i strekksonen, men tabellen over viser at tettheten er tilnærmet lik i case 1 for rett og bøyd kabel. Dette er ikke direkte sammenlignbart fordi kabelen i (2) ble aldret uten temperaturgradient.

Sammenligning av tettheten av sløyfetrær i case 1 viser et større sprik mellom strekk- og kompresjonssone i den bøyde kabelen enn i den rette. Selv om tettheten av sløyfetrær er redusert i begge sonene i case 1b, sett i forhold til 1a, er tettheten sterkere redusert i kompresjonssonen. Dette samsvarer med (2) og (3).

Kun case 1 hadde tilfeller av vanntrevekst på ytre halvleder, og tettheten er svært beskjeden slik det også ble nevnt i (2).

Tilsvarende som for case 1 er det liten/ingen endring i tettheten av ventilerte trær i bøyd og ubøyd kabel i case 2. I case 2b er tettheten av ventilerte trær i kompresjonssonen redusert med 20 % sammenlignet med 2a. Ved å studere tettheten av sløyfetrær i case 2 ser en tydelig reduksjon av trær i kompresjonssonen i den bøyde delen. I tillegg er det en økning i tettheten av trær i strekksonen sett i forhold til den rette kabelen. Dette er direkte sammenlignbart med (2) og bekrefter at antall trær reduseres i kompresjonssonen og øker i strekksonen.

For å sammenligne maksimal lengde for de forskjellige casene er verdiene plassert i Tabell 15.

Case	Sone	Ventilerte trær		Sløyfetrær
		Indre halvleder	Ytre halvleder	
1a	Strekk	242	157	242
	Kompresjon	273	136	242
2a	Strekk	242	n/a	121
	Kompresjon	166	n/a	121
1b	Strekk	348	76	348
	Kompresjon	257	152	303
2b	Strekk	303	n/a	333
	Kompresjon	273	n/a	106

Tabell 15: Maksimal vanntrelengde i forskjellige caser

Ved å sammenligne sløyfetrærne i case 1b og 2b, ser en at lengden i case 1b er lengre. Det stemmer overens med at vann i leder kombinert med temperatursykling gir lengre vekst av sløyfetrær slik det er hevdet i (4).

Den største trelengden finnes i strekksonene i de bøyde kablene, hvilket bekrefter utsagnet i (2) om lengre trevekst i strekksonene. I case 1b er sløyfetrengden i kompresjonssonen vesentlig lenger enn i case 2b. Det antas at det har sammenheng med at kabelen har blitt utsatt for temperatursykling (2) og (3).

Generelt sett skal det ikke være store forskjeller i antall trær eller lengde på trærne i de forskjellige sonene i de rette kablene. Figur 4 viser omtrent lik fordeling av case 1a. For case 1b ser en at sannsynligheten er litt større for å finne lengre trær i strekksonen. Lengre sløyfetrær i strekksonen samsvarer med (4).

Bratt stigning indikerer liten maksimal lengde. Figur 5 viser tydelig forskjell mellom strekksone og kompresjonssone i case 2b, og bekrefter derfor (2) og (3). Ved å sammenligne strekksonen for 2a og 2b ser en at lengre trær er mer sannsynlig å finne i strekksonen i 2b. Dette samsvarer med (2). Her må nevnes at to av plottene kun har to punkter, og kan derfor være noe misvisende. Slik det ble nevnt tidligere skulle en anta at sannsynlighetsfordelingen for 2a skulle hatt lik stigning.

Tabell 14, om tetthet, viser svært lav tetthet av ventilerte vanntrær i kompresjonssonen i case 1b. Tettheten var så lav at det ikke var mulig å få nok verdier til å plote sannsynlighetsfordelingen i Figur 6. (2) bekreftes ved at større vanntrelengder også for ventilerte trær er mer sannsynlig å finne i strekksonen i den bøyde kabelen, sammenlignet med ubøyd kabel.

For case 2 var tettheten av ventilerte trær så liten at analysen ble avsluttet etter studie av 100 snitt. Å få nok grunnlag til statistiske pålitelige verdier ville tatt for lang tid. Det hadde vært gunstig å ha et plott også for case 2 og sammenlignet det med case 1, slik at forskjellen mellom med og uten strømsykling kunne sammenlignes.

6. Konklusjon

En trippel ekstrudert XLPE-kabel aldret med spenning, utsatt for mekanisk statisk belastning gir lavere tetthet og kortere vanntrær, både ventilert- og sløyfetre, i den delen av kabelen som er utsatt for kompresjonskrefter. I de delene av kabelen som er blitt utsatt for strekkrefter øker tettheten og lengden på vanntrærne.

Tetthet og lengde av både ventilert- og sløyfevanntrær øker med aldringstiden.

For en trippel ekstrudert XLPE-kabel aldret med spenning, utsatt for temperatursykling med vann i leder og mekanisk statisk belastning øker tetthet og lengde av begge typene vanntrær. Samtidig vil kompresjonskrefter redusere tetthet av vanntrær også i dette tilfellet. Lengden av sløyfetrær i kompresjonssonen blir ikke begrenset i samme grad som for kabel aldret uten temperatursykling.

7. Referanser

1. **Forskningsrådet.** www.forskningsradet.no. [Internett]
<http://www.forskningsradet.no/servlet/Satellite?c=Prosjekt&cid=1232110435153&pagename=ForskningsradetNorsk/Hovedsidemal&p=1181730334233>.
2. **Nordås, S. og Ildstad, E.** *The Influence of Strain on Water Treeing in XLPE Power Cables.* 2010.
3. **Ildstad, E., et al.** *Influence of Mechanical Stress and Frequency on Water Treeing in XLPE Cable Insulation.* 1990.
4. **Sletbak, J. og Ildstad, E.** *The Effect of Service and Test Conditions on Water Tree Growth.* 1983.
5. **Ildstad, E.** *Cable Technology, High Voltage Equipment.* 2009.
6. **British Standards.** *Electric Cables - Calculation of the current rating: Part 2: Thermal Resistance, IEC 60287-2-1:1994+A2* 2006.
7. **British Standards.** *Electric Cables - Calculation of the current rating, IEC 60287-1-1:2006.*
8. **Ildstad, E.** *Electric Power Engineering, High Voltage Insulating Materials.* 2009.
9. **Ildstad, E.** *Water Migration and Water Treeing in Cross-Linked Polyethylene Cables.* 1982.
10. **Faremo, H., Ildstad, E. og Sletbak, J.** *Water Treeing and Breakdown Strength Reduction of XLPE Insulation.* 1989.

Kilder til forside

1. Bilde: http://www.aftenbladet.no/archive/00225/hywind_04_jpg_225965a.jpg
2. Bilde: Fra presentasjon av Ståle Nordås, *Sammendrag av PhD – Vanntrevekst i dynamiske sjøkabler*, 2010
3. Bilde: http://www.tu.no/multimedia/archive/00026/OrmenLange_Submarine_26172d.jpg
4. Bilde: http://media.e24.no/archive/00444/PETROJARL_VARG_136_444183v.jpg
5. Bilde: <http://static.guim.co.uk/sys-images/Environment/Pix/pictures/2008/05/30/wind460.jpg>
6. Bilde: http://www.tu.no/multimedia/archive/00036/Kabel_h_ytoppl_sende_36434d.jpg
7. Bilde: http://t1.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcT_EuZQBzlZ8cXXWh_qJV9rxgdgiZhTsDJ423ZFL3bCKUNIRUmoV

Vedlegg 1

Utklipp av relevante formler fra "IEC 60287-1-1:2006; Electric cables - Calculation of the current rating"

2.1 AC resistance of conductor

The a.c. resistance per unit length of the conductor at its maximum operating temperature is given by the following formula, except in the case of pipe-type cables (see 2.1.5):

$$R = R'(1 + y_s + y_p)$$

where

R is the current resistance of conductor at maximum operating temperature (Ω/m);

R' is the d.c. resistance of conductor at maximum operating temperature (Ω/m);

y_s is the skin effect factor;

y_p is the proximity effect factor (y_s is equal to zero for cable with single conductor).

2.1.1 DC resistance of conductor

The d.c. resistance per unit length of the conductor at its maximum operating temperature θ is given by:

$$R' = R_o [1 + \alpha_{20} (\theta - 20)]$$

where

R_o is the d.c. resistance of the conductor at 20 °C (Ω/m);

The value of R_o shall be derived directly from IEC 60228. Where the conductor size is outside the range covered by IEC 60228, the value of R_o may be chosen by agreement between manufacturer and purchaser. The conductor resistance should then be calculated using the values of resistivity given in Table 1.

α_{20} is the constant mass temperature coefficient at 20 °C per Kelvin (see Table 1 for standard values);

θ is the maximum operating temperature in degrees Celsius (this will be determined by the type of insulation to be used); see appropriate IEC specification or national standard.

2.1.2 Skin effect factor y_s

The skin effect factor y_s is given by:

$$y_s = \frac{x_s^4}{192 + 0,8x_s^4}$$

where

$$x_s^2 = \frac{8\pi f}{R'} 10^{-7} k_s$$

II

f is the supply frequency in hertz.

Values for k_s are given in Table 2.

Table 1 – Electrical resistivities and temperature coefficients of metals used

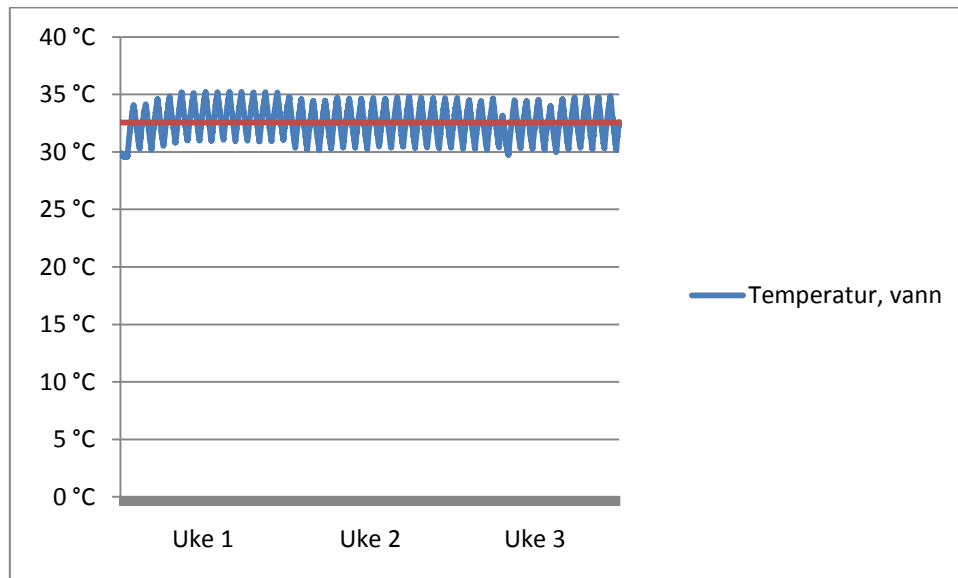
Material	Resistivity (ρ) ohm · m at 20 °C	Temperature coefficient (α_{20}) per K at 20 °C
a) Conductors		
Copper	1,724 1 10 ⁻⁸	3,93 10 ⁻³
Aluminium	2,826 4 10 ⁻⁸	4,03 10 ⁻³
b) Sheaths and armour		
Lead or lead alloy	21,4 10 ⁻⁸	4,0 10 ⁻³
Steel	13,8 10 ⁻⁸	4,5 10 ⁻³
Bronze	3,5 10 ⁻⁸	3,0 10 ⁻³
Stainless steel	70 10 ⁻⁸	Negligible
Aluminium	2,84 10 ⁻⁸	4,03 10 ⁻³
NOTE Values for copper conductors are taken from IEC 60028. Value for aluminium conductors are taken from IEC 60889.		

**Table 2 – Skin and proximity effects –
Experimental values for the coefficients k_s and k_p**

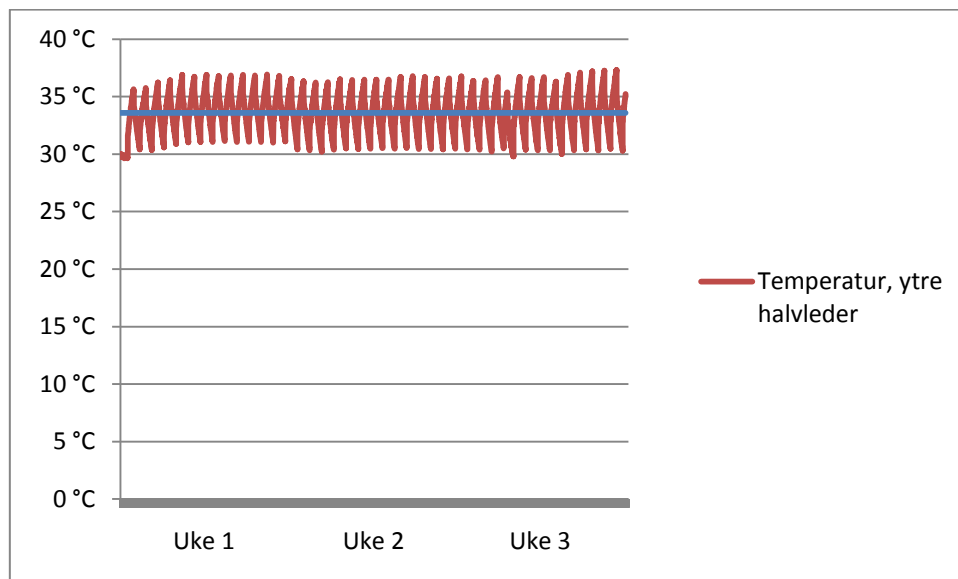
Type of conductor	Whether dried and impregnated or not	k_s	k_p
<i>Copper</i>			
Round, stranded	Yes	1	0,8
Round, stranded	No	1	1
Round, segmental ^a		0,435	0,37
Hollow, helical stranded	Yes	b	0,8
Sector-shaped	Yes	1	0,8
Sector-shaped	No	1	1
<i>Aluminium</i>			d
Round, stranded	Either	1	
Round, 4 segment	Either	0,28	
Round, 5 segment	Either	0,19	
Round, 6 segment	Either	0,12	
Segmental with peripheral strands	Either	c	

Vedlegg 2

Temperaturlogging



Figur 1: Temperaturlogging av vannet



Figur 2: Temperaturlogging på utsiden av ytre halvleder