

Vanntrevekst i mekanisk og elektrisk påkjente PEX-kabler

Truls Amundsen Lindseth

Master i energi og miljø
Oppgaven levert: Juli 2011
Hovedveileder: Erling Ildstad, ELKRAFT

Forord

Denne masterutredningen er skrevet ved Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet våren 2011 og inngår som en avsluttende del av masterstudiet Energi og miljø med fordypning i elektrisk energiteknikk. Tittelen på oppgaven er: Vanntrevekst i mekanisk og elektrisk påkjente PEX-kabler.

Masteroppgaven er en videreføring av et prosjekt utført av PhD-student Ståle Nordås. Oppgaven er også en del av et større prosjekt om dynamiske sjøkabler som utføres av NTNU/SINTEF Energi AS. Prosjektet er ledet av seniorforsker ved SINTEF, Hallvard Faremo. Prosjektet er sponset av Norges Forskningsråd og gjennomføres i nært samarbeid med aktører i industrien.

Masteroppgavens tema er relatert til en liten del av problematikken til dynamiske sjøkabler. Kort fortalt handler oppgaven om vanntrevekst, og i hvilken grad mekanisk belastning av sjøkabler akselererer veksten av vanntrær. Vanntrær er et viktig fenomen i denne sammenheng, fordi vanntrær kan redusere levetiden til polymerisolerte kabler [1].

Tre laboratorieforsøk med mekanisk og elektrisk påkjenning av PEX-kabler ble gjennomført, hvor det første forsøket ble gjennomført høsten 2010 i forbindelse med følgende prosjektoppgave [5]. De to andre forsøkene ble utført våren 2011.

Det ene av forsøkene som er dokumentert i denne masteroppgaven ble gjennomført med en spesialbygd testrigg. Testriggen gav mange utfordringer. I all hovedsak var riggen underdimensjonert i forhold til kreftene kabelen ble utsatt for. Slitasje på bevegelige deler krevde stadige justeringer og oppgraderinger. Med stor hjelp av, og godt samarbeid med, ingeniør på elkraftteknikkverkstedet Oddvar Landrø ble forsøket gjennomført med 3 ukers aldringstid.

Gjennomføring av masteroppgaven krevde stor kreativitet, engasjement og gode praktiske ferdigheter, da store deler av oppgaven bestod av praktisk arbeid i laboratoriet.

Under forsøksperioden ble jeg utsatt for en ulykke på laboratoriet. Jeg fikk en finger i klem mellom roterende deler på testriggen, som førte til brudd i finger og ledd. Dette førte til forsinkelser i arbeidet og fristen for levering av masteroppgaven ble forlenget med 4 uker. Utsettelsen bidro i forhold til skrivingen av rapporten, men ikke i forhold til det gjenstående laboratoriearbeidet. Oddvar Landrø var uvurderlig i denne perioden ettersom det gjenstod arbeid med testriggen. Med hans hjelp førte ikke skaden til avgrensninger i arbeidet.

Jeg ønsker også å takke min veileder og professor Erling Ildstad for god veiledning og konstruktive innspill under arbeidet med oppgaven.

Jeg ønsker også å takke avdelingsingeniørene ved institutt for Elektrisk energiteknikk ved NTNU, Bård Almås og Thor Lohse for arbeidet med montering av tekniske installasjoner.

En takk rettes også til doktoringeniør Svein Magne Hellesø, forsker og ansatt i SINTEF. Han har vært en viktig deltaker i forsøket med testriggeren og har blant annet bidratt med oppkobling av måleinstrumenter til å måle kreftene kablene ble belastet med.

Jeg vil også takke utvekslingsstudent Malo Tanvet for sin hjelp med mikroskopanalysen. Uten han ville det vært vanskeligere å gjennomføre begge forsøkene ettersom både mikroskopanalysen og laboratoriearbeidet er veldig tidkrevende.



Truls Amundsen Lindseth

Sammendrag

Vanntredegradering er identifisert som en mekanisme som kan redusere levetiden til polymerisolerte kabler. Vanntrær vokser i elektrisk påkjente polymerisolerte kabler som utsettes for fuktige omgivelser. Kabler som skal brukes til elektrifisering av flytende offshore oljeinstallasjoner og til nettilkobling av flytende vindturbiner vil i tillegg utsettes for dynamisk mekanisk belastning. Formålet med denne oppgaven er å studere hvordan vanntreveksten i PEX-isolerte kabler blir påvirket av både statisk og dynamisk mekanisk belastning.

Tre eksperimenter er gjennomført i forbindelse med denne oppgaven. Samme type 12 kV trippelstruderte PEX-kabel ble brukt i alle forsøkene. Kablene ble påtrykt 50 Hz AC-spenning med verdi $U=2U_0$. I to av forsøkene ble kabelen utsatt for statisk mekanisk belastning. Kablene ble bøyd rundt rør for å innføre strekk- og kompresjonskrefter. I det ene forsøket ble kabelen aldret i 3 uker i et vannkar med vanntemperatur lik 30 °C. I det andre forsøket ble kabelen aldret i 3, 6 og 9 uker med vanntemperatur lik 60 °C. I begge disse forsøkene ble to kabler aldret parallelt hvor den ene ble aldret med temperaturgradient for å akselerere vanntreveksten i kabelen. I det tredje forsøket ble kabelen utsatt for både statisk og dynamisk mekanisk belastning. Alle kablene ble belastet med en strekkprosent, $\epsilon=6\%$. Én kabel ble belastet med statisk mekanisk belastning, mens to motorer med forskjellig rotasjonsfrekvens, montert på en spesialbygd testrigg, utførte den dynamiske belastningen på kablene samtidig som kablene ble påtrykt spenning. Den delen av kablene som ble mekanisk belastet var også i kontakt med vann. Vanntemperaturen i dette forsøket var 30 °C og aldringstiden var 3 uker.

Ved hvert prøveuttak ble isolasjonen snittet, farget og analysert i mikroskop. Antall vanntrær og maksimal vanntrelengde for de ulike typene vanntrær ble registrert i hvert snitt med hensyn til om delen av isolasjonen var blitt utsatt for strekk- eller kompresjonskrefter.

I den delen av kabelen som var belastet med kompresjonskrefter ble vanntreveksten redusert sammenlignet med en ubelastet rett kabel og med delen av den samme kabelen som ble belastet med strekkkrefter. Resultatene dokumenterte en reduksjon i forekomsten av ventilerte trær på 62-100 % i forhold til rett kabel.

Kabler aldret med temperaturgradient viser en signifikant økning av vanntrevekst sammenlignet med kabler aldret uten temperaturgradient. Forekomsten av ventilerte vanntrær er dokumentert opptil 20 ganger større i kabler aldret med temperaturgradient og gjennomsnittlig maksimal lengde er opp mot 14 ganger større. Og estimerte verdier beregnet med ekstremalverdistatistikk angir at det med 95 % sannsynlighet vil forekomme et ventilert tre som er lengre enn 89 % av isolasjonstykkelsen etter 9 ukers aldringstid.

Resultatene fra forsøket med den dynamiske testriggen viser en signifikant økning i forekomst og gjennomsnittlig maksimal lengde av vanntrær i mekanisk belastede kabler sammenlignet med en rett ubelastet kabel.

Innholdsfortegnelse

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | INNLEDNING | 1 |
| 1.1 | Formål | 1 |
| 1.2 | Bakgrunn..... | 1 |
| 1.2.1 | Flytende oljeinstallasjoner..... | 1 |
| 1.2.2 | Flytende vindturbiner | 2 |
| 1.2.3 | Dynamiske sjøkabler | 2 |
| 1.3 | Studiens arbeidsomfang..... | 4 |
| 1.4 | Hypotese | 4 |
| 2 | TEORI/LITTERATURSTUDIE..... | 7 |
| 2.1 | Modeller for initiering og vekst av vanntreer..... | 7 |
| 2.2 | Virkingen av mekanisk påkjenning av PEX-isolerte kabler på vanntrevekst..... | 8 |
| 2.3 | Virkingen av temperatur og temperaturgradient på vanntrevekst..... | 9 |
| 2.4 | Vanntrevekst..... | 11 |
| 2.4.1 | Initieringssted..... | 11 |
| 2.4.2 | Elektrisk felt..... | 11 |
| 2.4.3 | Vekstrate | 11 |
| 2.4.4 | Vanntretyper..... | 11 |
| 3 | METODE | 13 |
| 3.1 | Prøveobjekt | 13 |
| 3.1.1 | Beskrivelse av prøveobjekt | 13 |
| 3.1.2 | Prøveobjektets fysiske mål..... | 13 |
| 3.2 | Metodeutvikling..... | 14 |
| 3.2.1 | Statisk mekanisk belastning av kabler..... | 14 |
| 3.2.2 | Dynamisk mekanisk belastning av kabler | 19 |
| 3.3 | Vanntrealdring | 40 |
| 3.3.1 | Forberedelser av kabelobjekt..... | 40 |
| 3.3.2 | Elektrisk påkjenning..... | 41 |
| 3.3.3 | Overvåkning | 42 |
| 3.4 | Mikroskopyse..... | 42 |
| 3.4.1 | Forberedelse av kabelisolasjon til mikroskopyse | 42 |
| 3.4.2 | Utførelse av mikroskopyse | 44 |
| 3.5 | Statistisk presentasjon..... | 46 |

| | | |
|------------|---|-----------|
| 3.5.1 | Estimering av maksimal vanntrelengde med bruk av ekstremalverdistatistikk..... | 46 |
| 3.5.2 | Gjennomsnittlig maksimal lengde..... | 47 |
| 3.5.3 | Forekomst av vanntrær per centimeter kabelisolasjon | 47 |
| 3.5.4 | Grafisk fremstilling med prosentvis vekstfordeling | 47 |
| 3.5.5 | Annet..... | 48 |
| 4 | RESULTATER..... | 49 |
| 4.1 | Resultater fra eksperimentet med statisk mekanisk belastede kabler..... | 49 |
| 4.1.1 | Sammenligning av vanntrevekst i kabler belastet med strekk- og kompresjonskrefter | 49 |
| 4.1.2 | Sammenligning av vanntrevekst i kabler aldret med og uten temperaturgradient | 55 |
| 4.1.3 | Utvikling av gjennomsnittlig maksimal lengde over tid | 58 |
| 4.1.4 | Sammenligning av vanntrevekst ved ulike temperaturforhold..... | 60 |
| 4.1.5 | Vanntrevekst i statisk mekanisk belastede kabler sammenlignet med ubelastede kabler ... | 62 |
| 4.1.6 | Ventilerte trær ved ytre halvleder..... | 64 |
| 4.1.7 | Estimerte verdier av maksimal vanntrelengde | 64 |
| 4.2 | Resultater fra eksperimentet med dynamisk mekanisk belastede kabler | 66 |
| 4.2.1 | Forekomst av vanntrær per cm isolasjon..... | 67 |
| 4.2.2 | Gjennomsnittlig maksimal lengde..... | 68 |
| 4.2.3 | Estimerte verdier av maksimal vanntrelengde | 69 |
| 5 | DISKUSJON | 71 |
| 5.1 | Evaluering av resultatene | 71 |
| 5.1.1 | Statisk mekanisk belastning av kabler..... | 71 |
| 5.1.2 | Dynamisk mekanisk belastning av kabler | 76 |
| 5.2 | Evaluering av metodene..... | 77 |
| 5.2.1 | Bruk av ekstremalverdistatistikk | 77 |
| 5.2.2 | Mikroskopanalyse | 78 |
| 5.3 | Innvirkning av testforhold..... | 78 |
| 5.3.1 | Temperaturgradient | 78 |
| 5.3.2 | Vann i leder | 78 |
| 5.3.3 | Strekkrefter i forsøket med statisk mekanisk belastning av kabler | 78 |
| 5.3.4 | Strekkrefter i forsøket med dynamisk mekanisk belastning av kabler | 79 |
| 5.3.5 | Vanntemperatur | 79 |
| 5.4 | Feilkilder | 79 |
| 6 | KONKLUSJON | 80 |
| 7 | FORSLAG TIL VIDERE ARBEID..... | 81 |
| 8 | SYMBOLLISTE | 82 |

| | | |
|----------|---|---------------|
| 9 | REFERANSER | 84 |
| A | PPENDIKS..... | I |
| | Appendiks 1 - Beregning av strøm og ledertemperatur | I |
| | Appendiks 2 - Beregning av strekk i statisk mekanisk belastede kabler | IV |
| | Appendiks 3 - Vind og bølger | VI |
| | Appendiks 4 - Bruk av ekstremalverdistatistikk | VIII |
| | Appendiks 5 - Resultater fra statisk mekanisk belastning av kabler med T=30 °C | XIII |
| | Appendiks 6 - Resultater fra statisk mekanisk belastning av kabler med T=60 °C | XV |
| | Appendiks 7 - Resultater fra dynamisk mekanisk belastning av kabler | XVII |
| | Appendiks 8 - Sammenligning av forekomst av vanntreer per cm isolasjon i strekk- og kompresjonssone..... | XVIII |
| | Appendiks 9 - Sammenligning av gjennomsnittlig maksimal lengde i strekk- og kompresjonssone..... | XX |
| | Appendiks 10 - Sammenligning av gjennomsnittlig maksimal lengde i kabler aldret med forskjellig temperatur | XXII |
| | Appendiks 11 - Electric cables – Calculation of the current rating (IEC-standard) | XXIV |
| | Appendiks 12 - Plott av sannsynlighetsfordeling på ekstremalverdipapir | XXVI |
| | Statisk mekanisk belastede kabler, T=30 °C..... | XXVI |
| | Appendiks 13 - Plott av sannsynlighetsfordeling på ekstremalverdipapir | XXVIII |
| | Statisk mekanisk belastede kabler, T=60 °C..... | XXVIII |
| | Appendiks 14 - Plott av sannsynlighetsfordeling på ekstremalverdipapir | XXXVII |
| | Dynamisk mekanisk belastede kabler, T=30 °C | XXXVII |
| | Appendiks 15 - Resultater fra bruk av ekstremalverdistatistikk | XL |
| | Statisk mekanisk belastede kabler..... | XL |
| | Dynamisk mekanisk belastning av kabler..... | XLII |
| | Appendiks 16 - Målinger av strekkrefter | XLIII |
| | Appendiks 17 - Temperaturmålinger..... | XLV |
| | Appendiks 18 - Bilder av vanntreer..... | XLVI |

1 Innledning

1.1 Formål

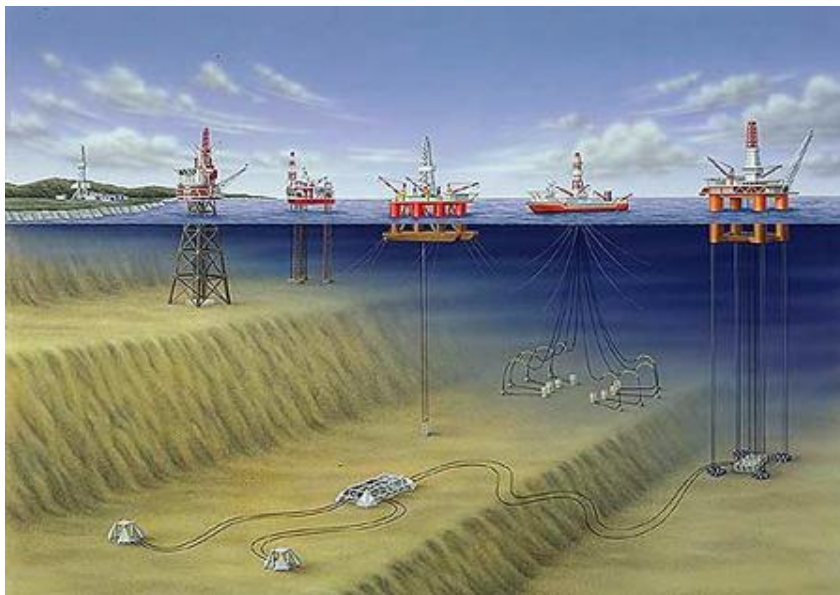
Formålet med oppgaven er å studere effekten elektrisk og mekanisk påkjenning av kabler har på vanntrevekst i PEX-isolerte kabler.

1.2 Bakgrunn

Levetiden til polymerisolerte kabler som eksponeres mot fuktighet kan reduseres av vanntredegradering [1]. I eldre kabeltyper er det funnet sammenheng mellom mekanisk belastning av kabler og vanntrevekst. Polymerisolerte kraftkabler er i den seneste tid blitt veldig aktuell til elektrifisering av offshore installasjoner til olje- og gassproduksjon. Noen av disse er flytende installasjoner. Samtidig er det et ønske om å utnytte potensialet for vindkraft i et globalt perspektiv bedre med flytende vindturbiner. Det er derfor interessant å undersøke om vanntreveksten også i nye kabler, med bedre kvalitet, påvirkes av mekanisk belastning.

1.2.1 Flytende oljeinstallasjoner

Det finnes tre ulike typer flytende oljeinstallasjoner, vist til høyre i Figur 1.1.



Figur 1.1: Illustrasjon av forskjellige typer oljeinstallasjoner. Fra venstre: Onshore oljeplattform, oljeplattform med bunnfast stålunderstell, oppjekkbar oljeplattform (Jack-up), halv nedsenkbar oljeplattform, bore- og produksjonsskip, strekkstagplattform (Tension-leg platform, TLP).

På den norske kontinentalsokkelen er den halvt nedsenkbare boreplattformen mest brukt. Fordelen med flytende installasjoner er at de er mobile og at de kan plasseres på store havdyp. Men så lenge plattformen er flytende vil den bli belastet med krefter fra vind, bølger og havstrømmer. Ute på åpent hav kan kreftene være tilstrekkelig til å sette plattformen i bevegelse.

1.2.2 Flytende vindturbiner

Dagens offshore vindmølleparker består av vindturbiner montert på forskjellige fundament som er festet til havbunnen. Det medfører at parkene ikke kan plasseres på havdyp på mer enn 60 meter. Geografiske områder som er egnet for denne typen vindmølleparker er begrenset. Det er derfor ønskelig å bruke flytende konstruksjoner som er mulig å installere på vanndybder opptil 700 meter.

Flytende vindmøller er foreløpig ikke kommersielt tilgjengelig, men det er iverksatt flere prosjekter med fullskala flytende vindmøller. Hywind er navnet på verdens første flytende vindturbin og er plassert utenfor kysten av Norge. Turbinen har en kapasitet på 2,3 MW og prosjektet er drevet av Statoil og Hydro. Utenfor østkysten av Skottland har SeaEnergy Renewables satt opp to flytende vindturbiner. Disse er større enn Hywind med kapasitet på 5,5 MW.

Potensialet for flytende vindkraft er stort, slik Figur 1.2 viser [2]. Utenfor kysten av Portugal, Isle of Main og staten Massachusetts i USA er det planlagt prosjekter med flytende vindmøller.

Den største usikkerheten med flytende vindturbiner ligger i de kompliserte bevegelsene som vind og bølger vil påføre vindturbin konstruksjonen. Konstruksjonen kan flyttes i tre retninger og rotere i tre retninger, og har dermed seks frihetsgrader. Bevegelsen i konstruksjonen vil forplante seg til kraftkabelen som er koblet til undersiden av konstruksjonen. Foruten bevegelsene, vil kabelen også bli belastet av sin egen vekt når den henger fra havoverflaten og ned til havbunnen.



Figur 1.2: Globalt potensial for flytende vindkraft.

1.2.3 Dynamiske sjøkabler

En sjøkabel er ofte en kombinasjon av to typer kabler, en dynamisk og en statisk kabel. Den dynamiske kabelen er koblet mellom installasjonen på vannoverflaten og den statiske kabelen på havbunnen. Kabelen kalles dynamisk fordi den blir utsatt for bevegelse.

Operativselskapet Statoil ønsket en plattform, som den første i verden, med strømforsyning fra land. I 2008 ble kraftkabelen ut til Gjøa-plattformen omtalt som verdens lengste vekselstrøm sjøkabel [3]. Totallengden er 100 km, hvor den dynamiske kabelen utgjør 1,5 km. Slike pionerprosjekter støter ofte på teknologiske utfordringer. Statoil uttalte selv at det mest krevende med prosjektet var relatert til den dynamiske kabelen [4]. Det høye spenningsnivået, 115 kV, var en stor utfordring. Feltstyrken i kabler i mellomspenningssjiktet regnes som liten, slik at vanntrevekst ikke reduserer kabelens levetid. Derimot fra 36 kV og oppover vil feltstyrken øke og vanntrevekst kan utgjøre et problem for isolasjonens dielektriske holdfasthet. Isolasjonen bør derfor holdes tørr. Blykappe er en vanlig del i kabeloppbygningen til statiske sjøkabler. Men en blykappe er for stiv og vil få brudd dersom den blir utsatt for bevegelse [3]. ABB, som produserte kabelen til Gjøa-plattformen, utviklet en spesiell korrugert kobberkappe som erstatning for blykappen. Kappa ble lagt utenpå hver av de tre lederne.

Til offshore vindmøller har det vært vanlig å bruke kabler i mellomspenningssjiktet, rundt 35 kV. Disse kablene har ikke hatt metallkapper for å hindre at vann trenger inn i isolasjonen. Vanntrevekst fortsetter derfor å være et interessant tema innen kabelteknologi.

Armering er en del av kabelkonstruksjonen. Både statiske og dynamiske kabler kan ha armering. Armeringens funksjon er å beskytte mot mekaniske skader, da særlig strekk. Der statiske kabler har ett lag med armering, har dynamiske kabler typisk flere lag med armering, nettopp fordi det er der den mekaniske belastningen vil være størst. Armeringen kan bestå av staver av karbon eller stål, spiralisert rundt kabelens lengderetning. Der man har behov for to eller flere lag, spiraliseres lagene i motsatt retning av det forrige laget, for å unngå at kabelen tvinner seg.

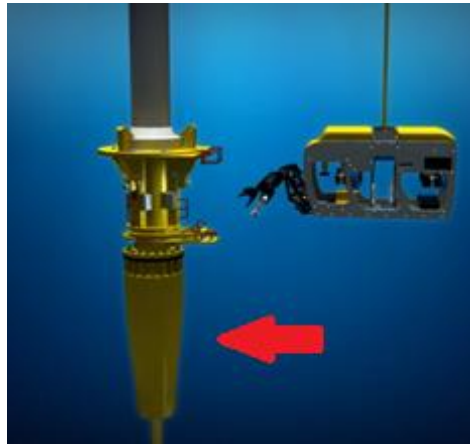
Figur 1.3 viser bilder av ulike kabler. Bildet til venstre i figuren er bilde av en statisk sjøkabel. Den statiske kabelen har blykappe og ett lag med armering. Bildet i midten og bildet til høyre er av dynamiske sjøkabler. Begge de dynamiske sjøkablene har to eller flere armeringslag.



Figur 1.3: Eksempler på sjøkabler.

For å redusere dynamisk bevegelse av kabelen kan den monteres med en bøyestiver (eng. bend stiffener). Bøyestiveren plasseres på utsiden av kabelen og er montert på

installasjonen på havoverflaten. Figur 1.4 viser bilde av en bøyestiver. Den røde pila i bildet peker mot bøyestiveren.



Figur 1.4: Bøyestiver.

1.3 Studiens arbeidsomfang

I arbeidet med denne oppgaven er det gjennomført tre forskjellige eksperimenter. Samme type 12 kV trippelstrudert PEX-kabel (krysslinket polyetylen) ble brukt i alle forsøkene. I to av forsøkene ble kabelen utsatt for statisk mekanisk belastning. Kablene ble bøyd rundt rør. I det ene forsøket ble kabelen aldret i 3 uker i et vannbasseng med vanntemperatur lik 30 °C. Vanntemperaturen i det andre forsøket var 60 °C og kablene ble aldret i 3, 6 og 9 uker. I det tredje forsøket ble kabelen utsatt for dynamisk mekanisk belastning. To motorer med forskjellig rotasjonsfrekvens, montert på en spesialbygd testrigg, utførte den dynamiske belastningen på kabelen samtidig som kabelen ble påtrykt spenning (aldret). Vanntemperaturen i det tredje forsøket var 30 °C og aldringstiden var 3 uker.

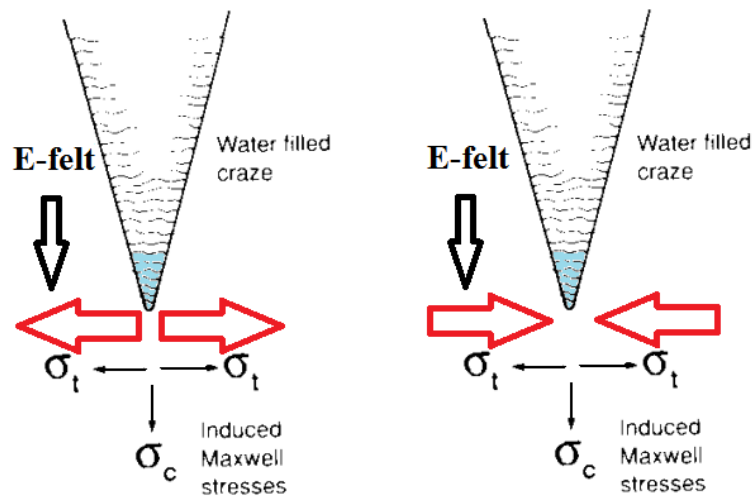
Kablene ble utsatt for elektrisk og mekanisk belastning i fuktige omgivelser i 3-9 uker. Snitt av isolasjonen ble farget og analysert i mikroskop. Antall vanntreer og lengden av det lengste vanntreet i hvert snitt ble dokumentert.

1.4 Hypotese

I tidligere forsøk med statisk mekanisk belastning av trippelstruderte kabler ble det konkludert med at det vil forekomme færre og kortere vanntreer i isolasjonen utsatt for kompresjonskrefter. I strekksonen vil det forekomme flere og lengre vanntreer [5, 6]. Skissen til venstre i Figur 1.5 illustrerer hvordan strekkraftene antas å påvirke sprekkdannelse. Det er rimelig å anta at strekkraftene adderes til Maxwell-kraftene og at det derfor kreves lavere energi for å bryte polymerkjedene. Strekkraftene er merket med røde piler i illustrasjonen.

En måte å redusere sprekkdannelse på er å introdusere kompresjonskrefter [7]. Illustrasjonen til høyre i Figur 1.5 viser den antatte retningen til kompresjonskreftene med

røde piler. Slik illustrasjonen antyder, antas kompresjonskreftene å virke i motsatt retning av Maxwell-kreftene og hindre, eller redusere, sprekkdannelse.



Figur 1.5: Sprekkdannelse med Maxwell-krefter og strekk- og kompresjonskrefter.

Tidligere eksperimenter har vist sammenheng mellom vanntrevekst og temperatur. Vantrær vokser raskere med vann i varm leder. Vann i leder kombinert med temperaturgradient i isolasjonen fører til evigvarende akkumulering av kondensert vann i isolasjonen som igjen fører til drastisk økning i tetthet, størrelse og vekstrate av bowtie-trær (eng. bowtie trees) [5, 8] og ventilerte trær (eng. vented trees) [5].

I et forsøk med kabler med fastsittende halvleder ble det dokumentert at ventilerte trær i hovedsak vil initieres og vokse ved indre halvleder [9].

Det er dokumentert at gjennomsnittlig maksimal lengde av vantrær øker med økt aldringstid [8]. Det er også dokumentert at lengden av ventilerte trær øker som funksjon av aldringstiden [10]. I begge disse eksperimentene var aldringstiden tilnærmet lik som den benyttet i eksperimentet i denne rapporten. Det antas derfor at gjennomsnittlig maksimal lengde vil øke som funksjon av aldringstiden.

Ekspirementene med statisk mekanisk belastede tripplekstruderte kabler beskrevet i denne rapporten er en sammensetning av mekanisk belastning av kabler i form av strekk og kompresjon, og aldring av kabler med vann i lederkanalen og temperaturgradient i isolasjonen. Det forventes derfor færre og kortere trær i kompresjonssonen. Det antas at forekomsten og lengden av vantrær er større i strekksonen. I kablene aldring med vann i leder kombinert med temperaturgradient i isolasjonen forventes større forekomst av vantrær og lengre trær enn i kabler aldring med kun vann i leder.

Relaksasjonen i PEX-isolasjon er avhengig av temperatur. Stivhetsmodulen (the shear modulus), G , for PEX avtar med økende temperatur [11]. Polymeren blir altså mykere ved høyere temperaturer. Ved å endre temperaturen på vannet kablene ligger i fra 30 °C til 60

°C forventes det at isolasjonen vil bli mykere. Sammenlignet med en kabel ved 30 °C antas det at en kabel ved 60 °C vil få færre sprekkdannelse ved påkjenning av strekkrefter fordi polymeren er mykere. Redusert sprekkdannelse betyr færre initieringssteder for vanntreær.

Ekperimentet med dynamisk mekanisk belastning av tripplekstruderte kabler beskrevet i denne rapporten er en sammensetning av mekanisk belastning av kabler i form av dynamisk strekk og aldring av kabler med vann i lederkanalen. Kablene med dynamisk mekanisk belastning antas å ha større forekomst og lengre vanntreær enn ubelastede kabler. Det forventes også at kabler aldring med dynamisk mekanisk belastning får økt akselerasjon av vanntrevekst sammenlignet med kabler aldring med statisk mekanisk påkjenning. Det antas at isolasjonen får økt akselerasjon av vanntrevekst når frekvensen til strekkreftene øker ettersom slitasjen av kabelen forventes å være større ved høy frekvens.

Polymerer, deriblant PEX, relakserer [12]. Det betyr at når polymeren belastes med strekkrefter vil polymeren tøyes. Størrelsen til strekkreftene reduseres med tiden og vil stabilisere seg på et lavere nivå. Størrelsen til strekkreftene som belaster kablene statisk og dynamisk i den dynamiske testtriggen antas å bli redusert under forsøksperioden som følge av relaksasjon i PEX-isolasjonen.

2 Teori/litteraturstudie

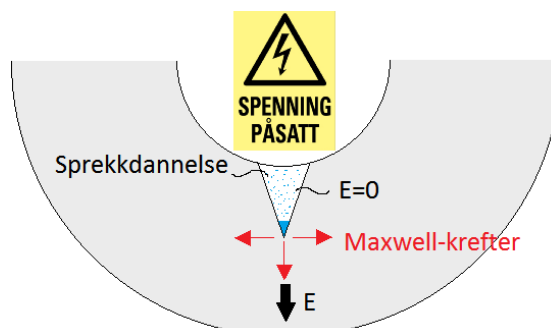
Etter stor interesse, med mye forskning og mange publikasjoner om fenomenet *vanntrevekst* fra midten av 70-tallet fram til starten av 90-tallet, har det vært en lengre pause i forskningen. Først i de siste årene har interessen tatt seg opp igjen. Mye av grunnen til det ligger i problematikken rundt dynamiske sjøkabler.

Kvaliteten til kablene, særlig med tanke på forurensninger i isolasjonen, har blitt mye bedre med tiden. Fra 1978 til 1992 ble det benyttet såkalt strippbar halvleder (eng. strippable semiconductor) på utsiden av PEX-isolasjonen [13]. Denne typen halvleder ble lagt utenpå PEX-isolasjonen som en strømpe, og i grenseflaten mellom isolasjonen og halvlederen oppstod ofte forurensninger og luftbobler som ble initieringssted for ventilerte vanntrær. I 1992 ble kablene produsert med fastsittende ytre halvleder, som ble ekstrudert på utsiden av isolasjonen. Forskjellen i kvaliteten på kablene må tas høyde for når resultater fra tidligere eksperimenter skal sammenlignes med resultater fra dagens eksperimenter.

2.1 Modeller for initiering og vekst av vanntrær

Fremdeles er det ikke full forståelse av selve mekanismen bak initiering og vekst av vanntrær. Mange forskjellige faktorer er involvert så det er vanskelig med sikkerhet å konkludere noe, men det er enighet om to mulige modeller [12, 14]:

- Den mekaniske modellen antar at det er lokal mekanisk overbelastning av isolasjonen som forårsaker initiering og vekst. Den lokale mekaniske overbelastningen antas å komme av Maxwell-krefter og kondensering av vann. Figur 2.1 illustrerer en sprekkdannelse fra indre halvleder. Vann har kondensert og samlet seg i spissen av sprekken. Fordi vannmolekylet er en dipol vil vannet settes i bevegelse av det alternerende elektriske feltet. Akkurat ved spissen av sprekken vil det oppstå en feltforsterkning. Det fører til at vannet vil slå mot isolasjonen med en frekvens på omtrent 100 Hz. Kraftene fra slagene til vannet virker vinkelrett på isolasjonsveggen og kalles Maxwell-krefter [6, 7].



Figur 2.1: Illustrasjon av den mekaniske modellen for vekst av vanntrær.

- Den elektrokjemiske modellen antar at påvirkningen av det elektriske feltet fører til lokale kjemiske reaksjoner. I grenseflaten mellom vanntrærne og polymeren dannes sprekker og kjeder av vannledende grupper som for eksempel karboksylat. Det vannledende nettverket gir økt diffusjon og sprekke gir rom for kondensering av vann.

De to metodene står nødvendigvis ikke i strid med hverandre; mekanisk overbelastning frigjør radikaler som starter kjemiske reaksjoner, og redusert mekanisk styrke av materialet kan forårsakes av kjemiske reaksjoner. Hvilken av årsakene som kommer først, er vanskelig å bekrefte.

2.2 Virkningen av mekanisk påkjenning av PEX-isolerte kabler på vanntrevekst

Når kabelisolasjon i humide omgivelser belastes med strekk- og kompresjonskrefter kombinert med elektrisk påkjenning vil den delen belastet med strekkrefter ha akselerasjon i vanntrevekst sammenlignet med delen utsatt for kompresjonskrefter [7, 10, 15, 16]. Ved å øke den mekaniske belastningen, i form av strekk, vil initieringen av ventilerte vanntrær gå raskere og vekstraten øker [7]. Når det gjelder vekst av bowtie-trær er det dokumentert at lengden til bowtie-trærne er større i strekksonen enn i kompresjonssonen [15, 16]. Det indikerer at vekstraten av bowtie-trær øker ved påkjenning av mekanisk strekk.

Effekten av strekk- og kompresjonskrefter er også dokumentert henholdsvis å akselerere og redusere vanntrevekst sammenlignet med ubelastede kabler [5, 6].

Det er kjent at interne strekkrefter kan oppstå i isolasjonen under nedkjølingen etter ekstruderingen under produksjonen av selve kabelen [6, 15]. De interne strekkreftene antas å være størst nær lederen av to grunner. Det ene er forskjellen i termisk ekspansjonskoeffisient for fast og smeltet polymer, da det ytterste isolasjonslaget avkjøles raskest. Det andre er effekten av at lederen, i aluminium eller kobber, har lav termisk ekspansjonskoeffisient sammenlignet med PEX. Denne belastningen er kompleks og virker både i radiell retning og i lengeretningen. Typisk størrelse på belastningen i isolasjonens lengderetning er fra 10-37 MPa [17]. Siden størrelsen til de interne strekkreftene er på høyde med hva som kan føre til brist i PEX, kan det antas at hulrom og små sprekkdannelse finnes i isolasjonen allerede etter produksjonen, spesielt i grenseflaten mellom halvleder og isolasjon. Under installasjon og drift vil kabelen kunne utsettes for ytterligere mekanisk belastning. Det gjelder spesielt for dynamiske kabler til bruk på offshore installasjoner. Der kablene belastes med strekkrefter forventes det at sprekkdannelse forekommer lettere.

Ved påtrykk av spenning vil Maxwell-kreftene belaste isolasjonen i form av strekk. Det skjer i hulrom som er fylt med vann. På tuppen av et slikt hulrom vil det dannes feltforsterkninger fra det elektriske feltet. Maxwell-kreftene står vinkelrett ut fra grense-

flaten mellom isolasjonen og den vannfylte sprekken, og har en størrelse per arealenhet lik [6, 14]:

$$\sigma = \frac{1}{2}(\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \left(E_{t1}^2 - \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} E_{n1}^2 \right) \quad (2.1)$$

hvor ε_1 og ε_2 er permittiviteten til de to materialene, og E_{t1} og E_{n1} er tangensial- og normalkomponenten til det elektriske feltet i grenseoverflaten. Dersom den vannfylte sprekken anses som elektrisk ledende kan kreftene per arealenhet i grenseflaten uttrykkes:

$$\sigma = \frac{1}{2}(\varepsilon_0 \varepsilon_r E^2) \quad (2.2)$$

der ε_0 er vakuumets permittivitet, ε_r er relativ permittivitet og E er den elektriske feltstyrken. Størrelsen til kreftene kan bli over 10 MPa i områdene med høy feltforsterkning [14].

Små hulrom i isolasjonen anses som et viktig forstadium for vanntreinitiering. Sprekkdannelse fra hulrommene krever lavere energi enn det som kreves for å bryte polymerkjedene uten hulrommene [6]. Det er dokumentert at kompresjonskrefter bremser vanntreveksten i form av redusert forekomst av vanntre og redusert lengde [6, 7, 16].

”Environmental stress-cracking” (ESC) er også en faktor som påvirker vanntreinitiering. Det har vist seg at når polymerer kommer i kontakt med enkelte væskeløsninger, for eksempel Igepal [18] og Antarox [7], akselereres sprekkdannelsene i polymerer. Mindre energi kreves for å danne nye sprekker for polymerer som har vært i kontakt med slike væsker, enn polymerer som bare har vært i kontakt med luft. En kombinasjon av elektrisk og mekanisk påkjenning av polymerer utsatt for slike væsker viser at initieringen av vanntre øker kraftig [7, 18, 19].

Det har ikke lyktes å finne relevant litteratur som beskriver forsøk med dynamisk mekanisk belastning av PEX-kabler. Det kan tyde på at forskningen er relativt ny. (SINTEF Energiforskning AS gjennomfører i skrivende stund et forsøk med dynamisk mekanisk belastede kabler.)

2.3 Virkningen av temperatur og temperaturgradient på vanntrevekst

Diffundering av vann i polymerer

I motsetning til glass og metall kan vann fritt passere gjennom organiske materialer fordi avstanden mellom molekylene er større enn størrelsen til vannmolekylet [12]. Polymerer, eksempelvis PEX, er organiske materiale. Vann kan opptre i organiske materialer som:

- Enslige vannmolekyler mellom polymerkjedene
- Vann festet til polymerkjedene med dipolbindinger
- Vanndråper

Diffusjon i PEX-kabler følger Ficks lov [8]:

$$F = -D \cdot \text{grad } C \quad (2.3)$$

hvor F er strømningshastigheten per arealenheter, D er diffusjonskoeffisienten og C er konsentrasjonen av diffusjonspartiklene.

Diffusjonskoeffisienten avhenger av temperaturen på følgende måte:

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{E_D}{RT}\right) \quad (2.4)$$

der D_0 er materialkonstanten, E_D er aktiveringsenergien til diffusjon, R er gasskonstanten og T er temperaturen.

Diffusjonskoeffisienten øker dermed med økt temperatur.

Overmetning av vann i polymerer

Temperaturgradient, ΔT , er et mål for endring av temperatur gjennom et materiale, i retningen der temperaturendringen er størst. Flere studier har vist at isolasjon med temperaturgradient gir overmetning av vann og økt vanntrevekst [5, 8].

Når strøm føres gjennom lederen vil motstanden, R , i kobberet sammen med strømmen, I , avgi en effekt, P :

$$P = R \cdot I^2 \quad (2.5)$$

Effekten som genereres avgis i form av varme, og temperaturen i lederen øker. Endringen i temperaturen er størst i radiellretning gjennom isolasjonen. Temperaturgradienten blir derfor temperaturforskjellen til kobberlederen og kabelens ytre halvleder:

$$\Delta T = T_{\text{leder}} - T_{\text{ytre halvleder}} \quad (2.6)$$

Vann i lederkanalen har vist seg å være ugunstig med tanke på overmetning av vann i isolasjonen [12]. Vann i varm leder kombinert med temperaturgradient i kabelen fører til evigvarende akkumulasjon av kondensert vann i isolasjonen [8]. Overmetningen kommer av at isolasjonen nær den varme strømførende lederen blir mettet av vann ved en høyere temperatur enn ved ytre halvleder. Det gir en konsentrasjonsgradient som fører til diffusjon fra området nær lederen inn i isolasjonen. Konsentrasjonen av vann vil være størst i midten av isolasjonen [8, 12]. Effekten av vann i varm leder og temperaturgradient i kabelen har vist seg å gi stor økning i tetthet, størrelse og vekstrate av bowtie-trær [8], så vel som for ventilerte trær [5].

2.4 Vanntrevekst

Til initiering og vekst av vanntre kreves et initieringssted, et alternerende elektrisk felt og relativ fuktighet av vann i isolasjonen høyere enn 70 % [6].

2.4.1 Initieringssted

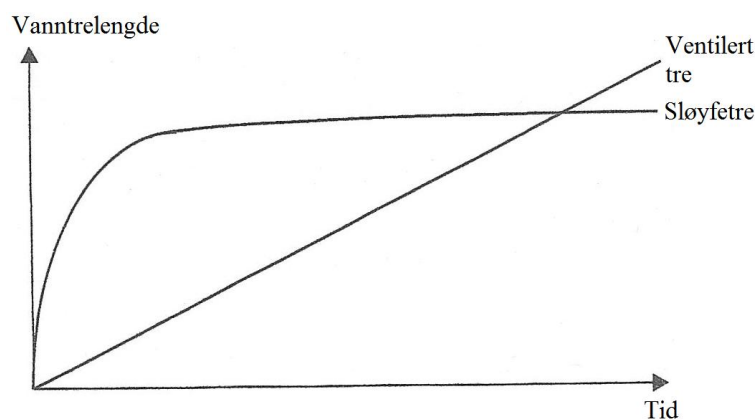
Et initieringssted vil typisk være en forurensning, et lite hulrom eller skade. Med forurensninger menes små partikler som under produksjonen har blandet seg i polymeren. Hulrom kan komme av små luftbobler eller fra strekkrefter.

2.4.2 Elektrisk felt

Når en kabel påtrykkes AC-spenning etableres et elektrisk felt. Feltets retning er radielt ut fra indre halvleder. Feltet utsetter isolasjonen for elektrisk stress. Benevnelsen til elektrisk felt er V/m. Vanntre er observert å vokse med feltstyrke under 1 kV/mm [12].

2.4.3 Vekstrate

Vanntre vokser parallelt med det elektriske feltets retning. Bowtie-trær vokser i to retninger, symmetrisk om initieringsstedet. Ventilerte vanntre vokser kun i én retning, inn i isolasjonen. Figur 2.2 viser vanntrelengden som funksjon av tid [12].



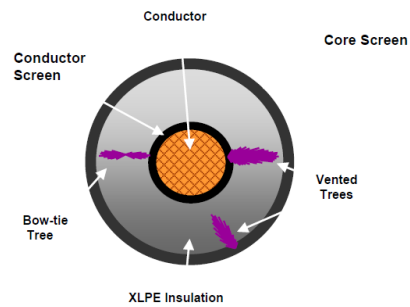
Figur 2.2: Vekstraten til vanntre.

Figuren antyder at initieringen av bowtie-trær er rask, og at veksten nesten stagnerer med tiden. Initieringen av ventilerte trær tar lenger tid, og de vokser med konstant hastighet. Tidsaksen i Figur 2.2 er typisk 10-20 år. Det er lengden av det lengste vanntreet i kabelen som anses som årsak til reduksjon av isolasjonenes holdespenning [20]. Det lengste treet vil typisk være et ventilert tre.

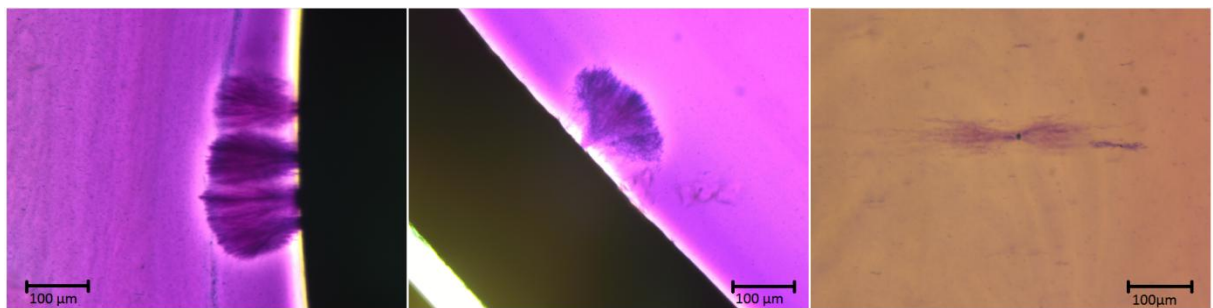
2.4.4 Vanntretyper

Det er plasseringen til initieringsstedet som avgjør vanntretypen. En forurensning inne i isolasjonen vil utvikles til et bowtie-tre, mens defekter på grenseflaten til ytre og indre

halvleder vil utvikles til ventilerte trær [12]. Det er også mulig å skille mellom ventilerte trær som vokser fra indre halvleder og ytre halvleder, se Figur 2.3 og Figur 2.4.



Figur 2.3: Illustrasjon av tverrsnittet av en PEX-kabel med plassering av vanntretypene.



Figur 2.4: a) Ventilerte trær ved indre halvleder b) Ventilert tre ved ytre halvleder c) Stort bowtie-tre.

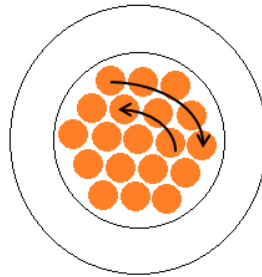
3 Metode

3.1 Prøveobjekt

3.1.1 Beskrivelse av prøveobjekt

Prøveobjektet som er benyttet i alle eksperimentene er en kommersielt tilgjengelig 12 kV trippelekstrudert PEX-kabel. Elementene i kabelen består av en kobberleder, en indre halvleder, isolasjon og en ytre halvleder. Indre halvleder, isolasjonen og ytre halvleder er ekstrudert i hvert sitt lag utenpå lederen, derav navnet trippelekstrudert kabel.

Kobberlederen består av 19 kordeler, kobbertråder, som til sammen utgjør et areal lik 95 mm^2 . En kordel er plassert i midten, deretter er to lag av kordeler tvunnet i hver sin roterende retning rundt senterkordelen. Se Figur 3.1:



Figur 3.1: Rotasjonsretningen til lederkordelene.

Halvlederene er laget av et plastmateriale blandet med sotpartikler slik at materialet blir ledende. Halvlederene sørger for en homogen fordeling av det elektriske feltet.

Isolasjonen er laget av krysslinket polyetylen (PEX).

3.1.2 Prøveobjektets fysiske mål

Figur 3.2 viser tverrsnittet av kabelen. $t_{\text{isolasjon}}$ er symbolet for kabelens isolasjonstykkelse. D_i og D_o er henholdsvis kabelens indre og ytre diameter.

Fysiske mål:

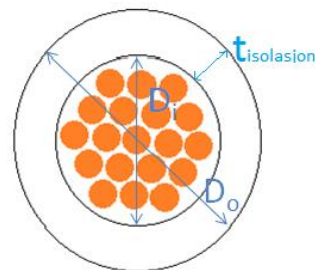
Indre diameter, $D_i = 11 \text{ mm}$

Ytre diameter, $D_o = 20,3 \text{ mm}$

Isolasjonstykkelsen, $t_{\text{isolasjon}} = 3,75 \text{ mm}$

Lederens tverrsnittsareal, $A_c = 95 \text{ mm}^2$

Isolasjonens tverrsnittsareal, $A_i = 228,65 \text{ mm}^2$



Figur 3.2: Tverrsnitt av prøveobjektet med forklaring på fysiske mål.

3.2 Metodeutvikling

3.2.1 Statisk mekanisk belastning av kabler

En bøyd kabel belastes med strekkrefter på den ene siden og kompresjonskrefter på den andre siden. For å utsette kablene for statisk mekanisk belastning ble de bøyd rundt rør og festet til rørene, som vist i Figur 3.3 [6]. Størrelsen på strekk- og kompresjonskreftene kan varieres ved å montere kablene til ulike rørdiametre. En kabel montert rundt et rør med stor rørdiameter utsettes for mindre krefter enn en kabel som er montert rundt et rør med liten rørdiameter.



Figur 3.3: En kabel bøyd rundt rør med fire forskjellige diametre.

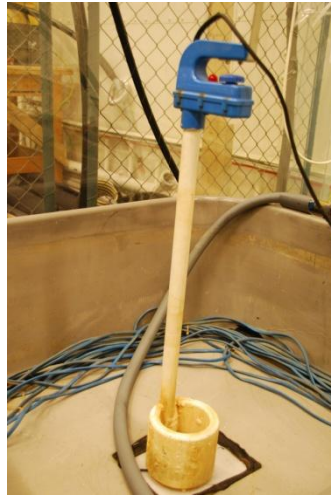
Et kabelobjekt ble montert til flere rør, enten for å variere rørdiameteren eller for å ta ut prøver etter forskjellig aldringstid. Figur 3.8 og Figur 3.9 illustrerer dette. Til eksperimentene ble det laget to like lange kabelobjekt. Det ene ble aldret med temperaturgradient og det andre ble aldret uten temperaturgradient.

Vanntemperatur

Kabelobjektene ble plassert i et vannkar fylt med omtrent 410 liter vann. Et varmeelement sørget å holde konstant temperatur på vannet. Varmeelementet leverte konstant effekt, og en temperaturinnstilt PID-regulator regulerte varmeelementet av og på. PID-regulatoren er avbildet til venstre i Figur 3.6.

Vanntemperaturen, T , ble valgt høyere enn omgivelsestemperaturen. For å hindre at vannet skulle fordampe ble vannoverflaten dekket med bobleplast. Bobleplast ble brukt for å sikre at plasten ikke skulle synke.

Det ble utført to eksperimenter med statisk mekanisk belastning. Vanntemperaturen var forskjellig i de to eksperimentene, med temperatur på henholdsvis 30 °C og 60 °C. En temperatur på 30 °C ble oppnådd ved hjelp av et varmeelement på omtrent 950 W. For å øke temperaturen ytterligere 30 grader ble et varmeelement på cirka 2300 W plassert i vannkaret. Figur 3.4 viser et bilde av varmeelementene, hvor de blå kablene er varmekabler.



Figur 3.4: Bilde av varmelementene.

Eksperimentet med vanntemperatur lik 30 °C ble utført høsten 2010, og viste at temperaturen ikke var homogen i vannbadet [5]. Det skyldtes trolig dårlig sirkulasjon i vannkaret. Av den grunn ble en sirkulasjonspumpe installert når temperaturen ble økt til 60 °C.

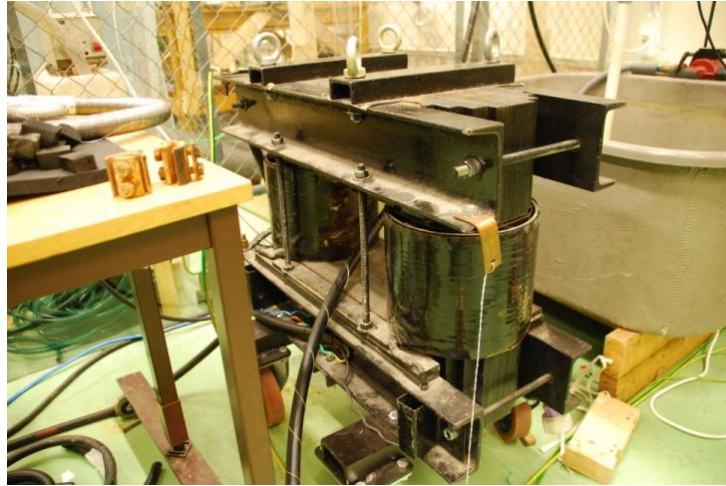
Temperaturgradient

For å få rask vanntrevekst grunnet kort aldringstid ble det bestemt at et av kabelobjektene skulle ha temperaturgradient. Temperaturgradienten til dette oppsettet ble valgt til 15 kelvin (K). Verdien til ΔT er tilfeldig valgt.

I følge ligning (2.5) øker effekten med andre potens av strømmen. Den teoretisk beregnede verdien av strømmen ble $I=458$ A. Beregningene er vedlagt i Appendiks 1. Beregningen av motstanden til kobberlederen er komplisert fordi motstanden er temperaturavhengig og på grunn av effektene av vekselstrøm (skin effect). Derfor ble det gjennomført et eksperiment for å teste om den teoretisk beregnede verdien av strømmen var nøyaktig nok til å gi en temperaturgradient lik 15 K.

Den samme kabelen, som ble omtalt i delkapittel 3.1, ble benyttet i det nevnte eksperimentet. Små hull ble boret inn til midten av lederen og termoelementer ble plassert i hullene for å måle ledertemperaturen. Termoelementer ble også festet på kabelens ytre halvleder. Det ble gjort tester med ulike strømverdier, mens temperaturen ble logget. Målingene viste at $I=464$ A gav $\Delta T=15$ K. De øvrige målingene fra dette eksperimentet er vedlagt i Appendiks 1.

Den strømførende kabelen ble montert slik at den dannet en sløyfe som gikk gjennom en split-core-transformator, se Figur 3.5. Kabelen hadde én sløyfe gjennom transformatoren, og viklingsforholdet var 1:30. Transformatoren induserer strøm i kabelen som ligger mellom viklingskjernene. Viklingsforholdet gjør at størrelsen på strømmen som forsyner transformatoren bestemmer størrelsen på strømmen i kabelen.



Figur 3.5: Split-core-transformatoren.

Strømmen i kabelobjektet ble påtrykt syklisk. Målingene fra eksperimentet i Appendiks 1 viste at 6 timer var nok tid for å oppnå stabile temperaturforhold både ved avkjøling og oppvarming. Det gav grunnlaget for å velge tidsintervallet på 6 timer. En tidsbryter koblet til en styringspult, kalt variac, sørget for at strømmen i kabelobjektet var på i 6 timer, så av i 6 timer, osv. Figur 3.6 viser bilde av tidsbryteren og styringspulten.



Figur 3.6: PID-regulatoren til temperaturstyringen (nederst til venstre), tidsbryteren til strømstyringen (øverst til venstre) og styringspulten til strømreguleringen (til høyre).

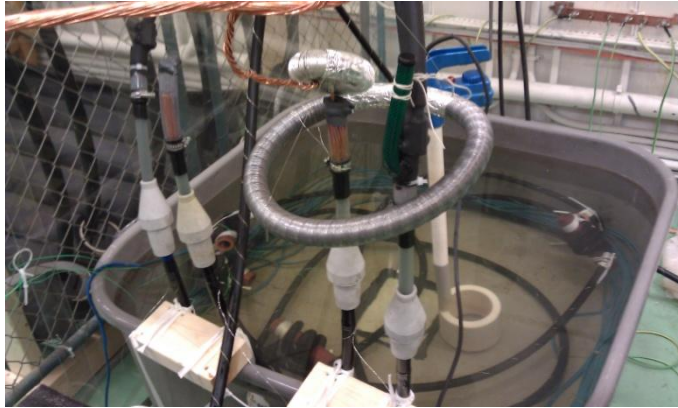
Temperaturen til kabelens ytre halvleder og vannet ble logget under forsøks tiden. Ledertemperaturen kunne ikke logges samtidig som lederen var påtrykt spenning.

I forsøket med $T=30\text{ °C}$ ble det observert at den avgitte effekten fra kabelen, da den var strømførende, gav en liten temperaturøkning i vannet. I rapporten som beskriver eksperimentet ble det foreslått at temperaturen kunne økes for å unngå temperatur-

svingninger [5]. Vanntemperatur lik 60 °C ble valgt til det neste eksperimentet. På den måten kunne også vanntreveksten ved de ulike temperaturene sammenlignes.

Vann i lederkanal

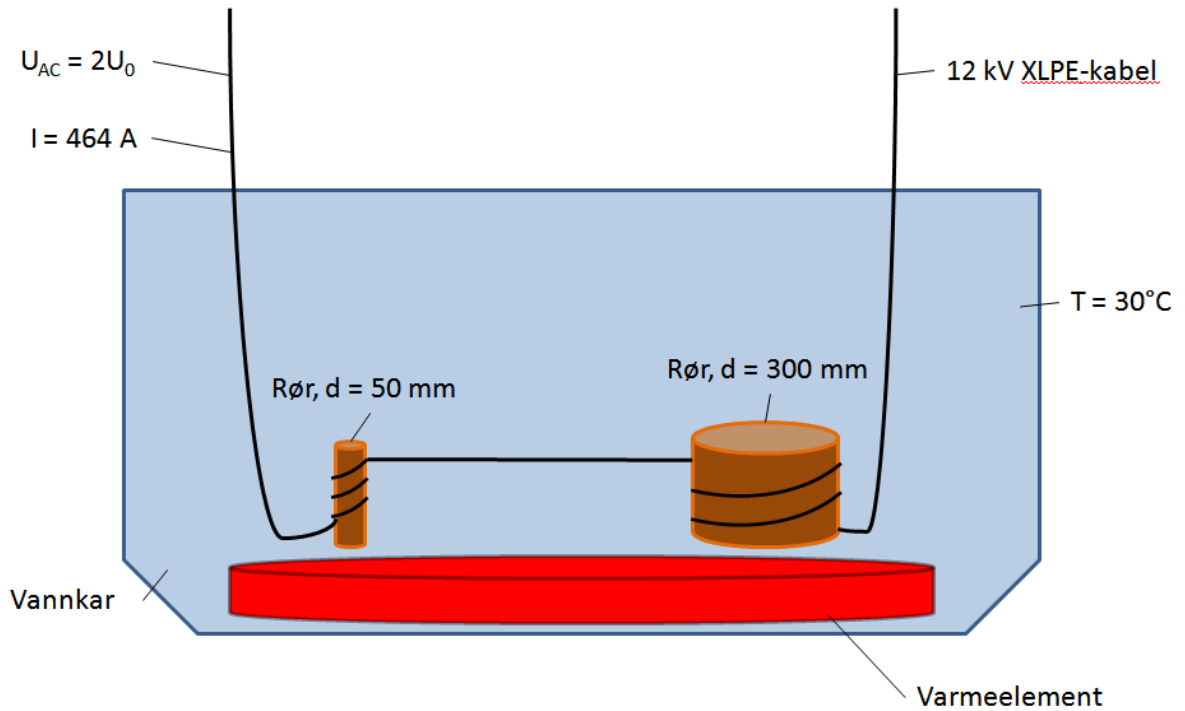
Lederkanalen ble fylt med vanlig springvann. For å sikre at lederkanalen ble helt fylt med vann, ble vannet fylt på i en ende av kabelen plassert høyere enn motsatt ende, helt til vannet rant gjennom.



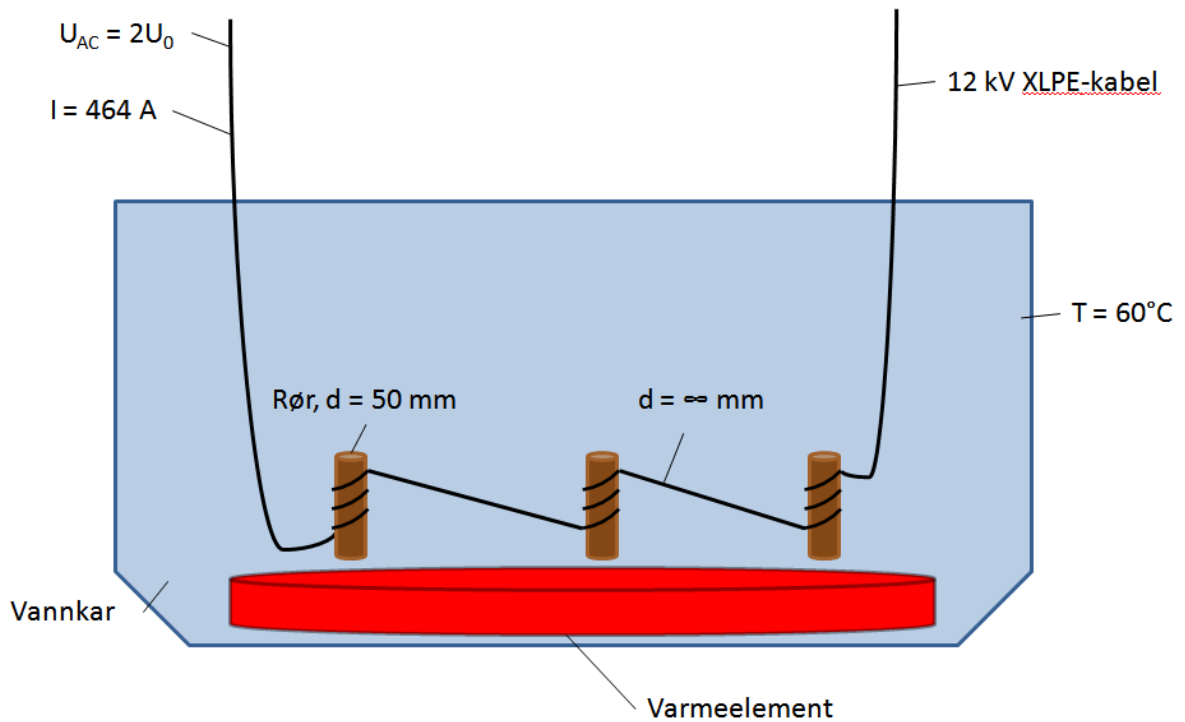
Figur 3.7: Endeavslutningene til kablene med mulighet for etterfylling av vann i lederkanalen.

Figur 3.7 viser bilde av løsningene for å hindre vannet i å fordampe ut av lederkanalen. To metoder ble etablert. Den ene var tilpasset kabelen uten temperaturgradient (de to midterste kablene i Figur 3.7). En liten del av et gjennomsiktig plastrør ble montert ved enden av isolasjonen med en rørklemme. Lengden til plastrøret var lenger enn ledere som stakk ut. Plastrøret ble forseglet for å unngå at vannet skulle fordampe. Løsningen gav også mulighet for enkel etterfylling av vann. Den andre metoden skulle hindre fordampning av vann fra kabelen med temperaturgradient. En krympestrømpe ble lagt utenpå skjøten mellom kabelobjektet og kabelen som gikk gjennom split-core-transformatoren. I den ene enden ble det montert en bit av en slange for enkel etterfylling av vann (se kabelen til høyre i Figur 3.7).

Figur 3.8 og Figur 3.9 viser det eksperimentelle oppsettet for statisk mekanisk belastning, henholdsvis med vanntemperatur 30 °C og 60 °C. Figur 3.10 viser bildet av det eksperimentelle oppsettet.



Figur 3.8: Skisse av det eksperimentelle oppsettet for statisk mekanisk belastning av isolasjonen med forskjellige rørdiameter og med vanntemperatur lik 30°C .



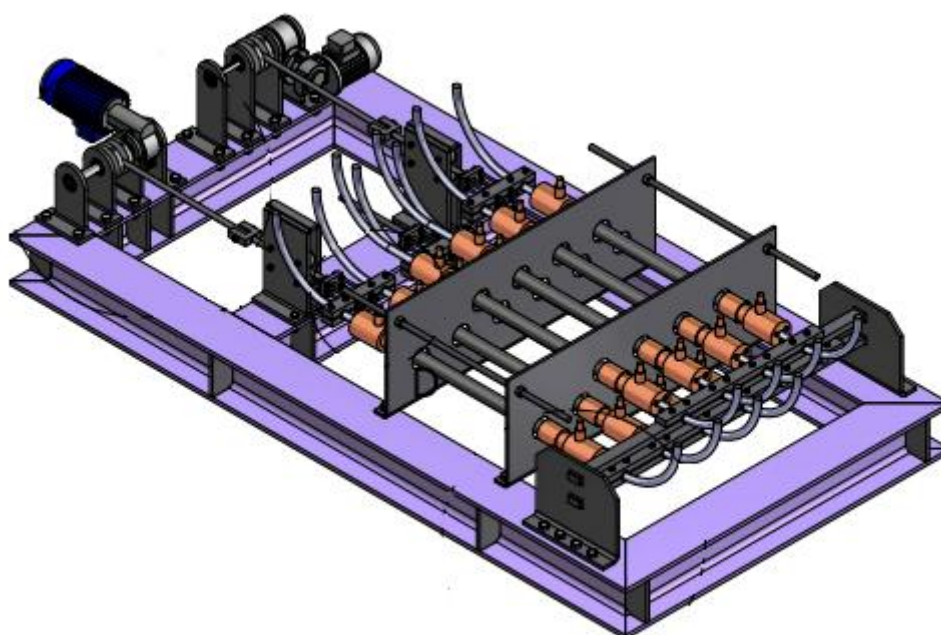
Figur 3.9: Skisse av det eksperimentelle oppsettet for statisk mekanisk belastning av isolasjonen med mulighet for flere prøveuttak og med vanntemperatur lik 60°C .



Figur 3.10: Apparaturen som ble brukt i eksperimentet med statisk mekanisk belastning av kabler.

3.2.2 Dynamisk mekanisk belastning av kabler

Det ble konstruert en egen testrigg til eksperimentet med dynamisk belastning av kabler. Designet av testriggeren ble utviklet av PhD-student Ståle Nordås i samarbeid med ingeniør Oddvar Landrø på verkstedet for Elkraftteknikk ved NTNU. Trondheim Stål AS brukte designet til å lage selve testriggeren.



Figur 3.11: 3D-skisse av den dynamiske testriggeren. Skissen er designet av Trondheim Stål AS.

Motorsystem og motorfrekvens

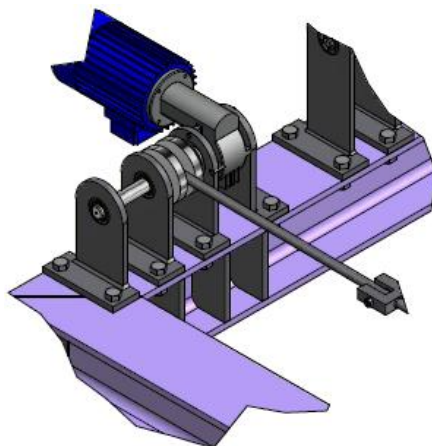
For å simulere krefter fra bølgebevegelser på kablene er to motorer festet til testtriggen. Motorene var koblet via en styringsboks slik at motorene kunne skrus på og av på utsiden av høyspenningscella. Motorene var montert på den ene enden av testtriggen (øverst til venstre i Figur 3.11).

Motorene er elektrisk drevet og har forskjellig frekvens. Motor 1 (M1) har en hastighet lik 1 sekund per omdreining, altså har motoren en frekvens på 1 Hz. Motor 2 (M2) har frekvens lik 0,1 Hz, som tilsvarer en hastighet lik 10 sekunder per omdreining. I Figur 3.11 er Motor 1 farget blå, plassert til venstre, og Motor 2 er farget grå, plassert til høyre.

Da testtriggen ble levert fra Trondheim Stål AS var Motor 2 montert med en hastighet på 100 sekunder per omdreining, $f=0,01$ Hz. Bevegelsen motoren gjør skal simulere bølgebevegelser, derfor syntes hastigheten å være for langsom. En vindbølge vil typisk ha bølgeperiode liggende mellom 2 sekunder til 5 sekunder [21]. Det ble derfor besluttet å skifte ut giret til motoren for å øke frekvensen. Ett og ti sekunder per omdreining vil være ytterpunktene for periodetiden til typiske vindbølger, og er derfor ansett som strategiske verdier å bruke i forsøkssammenheng. Ligning (A3.1) i Appendiks ble benyttet for å se hvilke periodetider dette samsvarer med. Disse periodetidene samsvarer med bølgelengder på henholdsvis 1,6 meter og 156,1 meter.

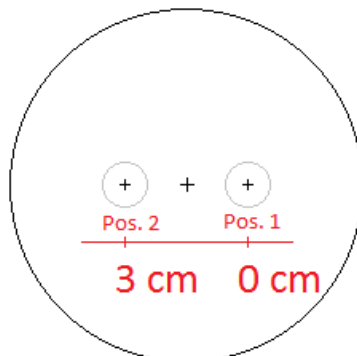
Drivhjul

Motorakslingen er koblet til et drivhjul. Drivhjulets oppgave er å overføre kraften fra motoren til kabelobjektene. Drivhjulet består av to deler. Den ene delen er koblet direkte til motorakslingen, den andre delen har en egen aksling uten motor og skal fungere som støtte til drivhjulet. En eksenterbolt kobler drivhjulene sammen og sørger for at akslingen uten motor går med samme hastighet som selve motorakslingen. Et stag er festet til drivhjulet, og i den andre enden av staget er festepunktene der kabelobjektene skal festes. To metallskiver på hver side av staget i Figur 3.12 utgjør drivhjulet.



Figur 3.12: Skisse av motor og drivhjul.

Drivhjulet går rundt når motoren skrues på. Det er rotasjonen til drivhjulet som beveger staget. Staget er festet til drivhjulet med en eksenterbolt, plassert 1,5 cm fra drivhjulets senter. Stagets maksimale bevegelsesutslag er dermed 3,0 cm, se Figur 3.13. De små sirkelene representerer eksenterbolten i to forskjellige posisjoner.



Figur 3.13: Skisse av drivhjul med forklaring av eksenterboltens posisjoner.

Løsningen på systemet med drivhjul og eksenterbolt var for enkel slik den ble levert fra Trondheim Stål AS. Ved testing av motorene ble det raskt klart at endringer måtte gjøres. Den originale løsningen var en 8 mm eksenterbolt som var plassert løst i 8 mm vide hull i drivhjulene. Hullene i drivhjulene var 5 mm dype. Staget var festet til eksenterbolten med et enkelt 8 mm hull gjennom staget.



Figur 3.14: Stag med eksenterbolt.



Figur 3.15: Drivhjul med hull til eksenterbolten.

Det er flere grunner til at denne løsningen ikke fungerte. Det første problemet var festet til eksenterbolten i drivhjulene. Da staget ble utsatt for last viste det seg at eksenterbolten ikke hadde nok støtte i det 5 mm dype hullet, slik at den beveget seg ut av ideell stilling. Dette gjorde at drivhjulet på motsatt side av motoren ble hengende etter, og posisjonen til eksenterbolten ble skjev. Bevegelsen til staget ble derfor også skjev, og staget slo mot drivhjulet under hver omdreining.

Det andre problemet var selve festet til staget. Hullet til eksenterbolten var for romslig og gav rom for ukontrollerte bevegelser, men det største problemet var slitasjen. Drivhjulet utsettes for krefter opptil 2,9 kN, se Appendiks 16. Etter kort tids drift kunne metallstøv observeres fra slitasje mellom eksenterbolten og staget. Bevegelse med metall mot metall gav slitasje og ville med tiden gi et brudd på eksenterbolten.

Figur 3.16 viser skadene på drivhjulet fra eksenterbolten. Hullet i drivhjulet var ikke dypt nok til å låse eksenterbolten i en fast stilling, og hullet ble derfor deformert.



Figur 3.16: Skade på drivhjulet fra eksenterbolten

Et kulelager var løsningen for å hindre slitasje mellom eksenterbolten og staget. Kulelageret ble plassert inne i en metallskive. Metallskiven ble laget for å unngå at kulelageret skulle vri seg i tilfelle eksenterbolten ble skjev. I tillegg ble det gjenget et feste til staget i metallskiven. Figur 3.17 viser bilde før og etter justeringen.



a)



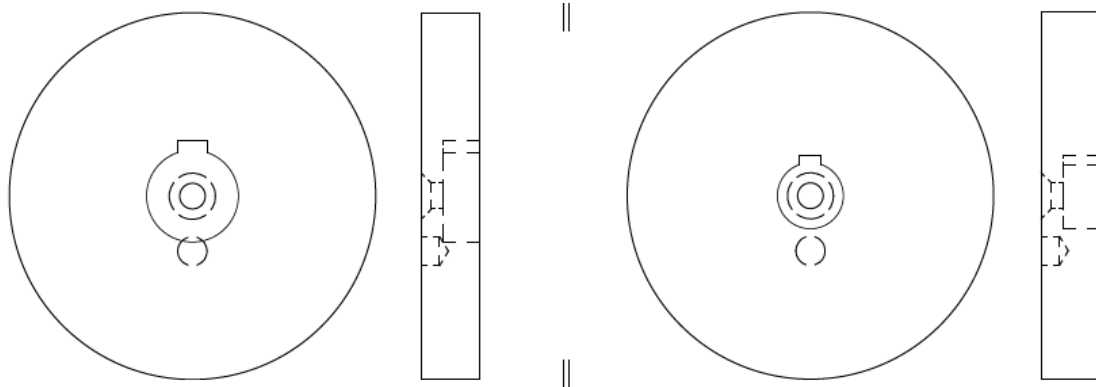
b)

Figur 3.17: a) Den originale løsningen med eksenterbolt og stag. b) Ny løsning med kulelager.

Den nye eksenterbolten var 14 mm tykk. Hullene i drivhjulene ble utvidet til samme dimensjon. Hullene ble også laget 4 mm dypere.

Selv med metallskiven utenpå kulelageret og dypere hull til eksenterbolten ble drivhjulet uten motor hengende etter, slik at eksenterbolten ble skjev. Det førte til at metallskiven gnisset mot drivhjulene. Festepunktet til eksenterbolten måtte endres.

Motor 1 og Motor 2 har forskjellig dimensjon på akslingen, henholdsvis 25 mm og 18 mm. Dersom hullet til eksenterbolten blir for dypt i drivhjulene til motor 1 vil hullet treffe festepunktet til akslingen. Figur 3.18 viser hvordan hullet til eksenterbolten vil kollidere med akslingen.



Figur 3.18: Skisse av drivhjulet sett forfra og fra siden. Drivhjulet til Motor 1 til venstre og drivhjulet til Motor 2 til høyre.

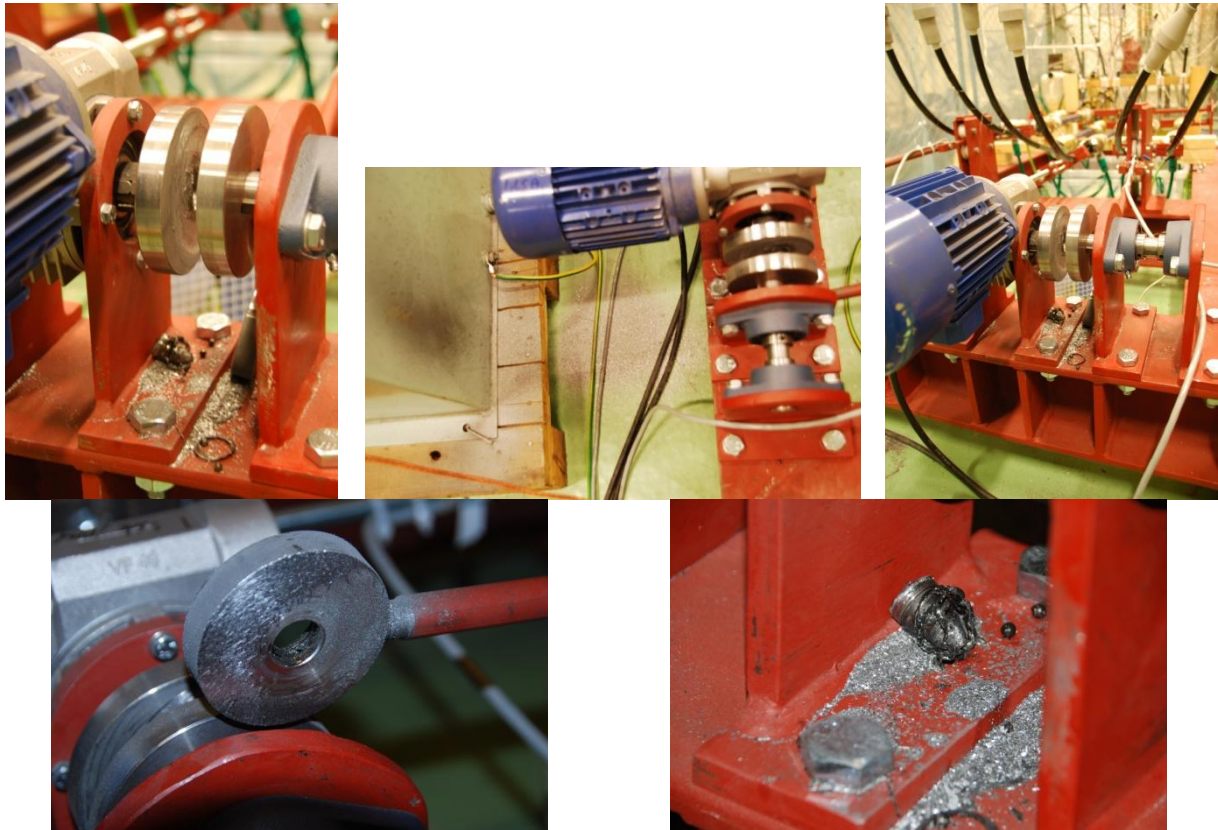
Et hull tvers gjennom drivhjulet til motor 2 ville ikke kollidere med akslingen. Til Motor 2 ble det laget en 14 mm eksenterbolt. Endene av bolten var 8 mm og gjenget. 8 mm hull i drivhjulet gjorde det mulig å feste bolten med mutter på baksiden av drivhjulet. En skisse av eksenterbolten er vist til høyre i Figur 3.19.

For motor 1 måtte en annen løsning benyttes pga. eksenterhullets plassering i forhold til akslingen. Eksenterbolten som ble laget var 14 mm. Endene var 8 mm. Kun den ene enden var gjenget. Drivhjulet på akslingen uten motor og den ene enden av eksenterbolten som var gjenget ble skrudd sammen. En liten bit av bolten måtte freses bort på baksiden av drivhjulet for å lage plass til akslingen. I drivhjulet som skulle monteres på motor-akslingen ble det laget et 14 mm dypt hull til eksenterbolten. Dersom eksenterbolten hadde vært skrudd fast til begge drivhjulene ville det umuliggjort monteringen av drivhjulene på akslingene.



Figur 3.19: Skisse av eksenterbolt til Motor 1 til venstre og til Motor 2 til høyre.

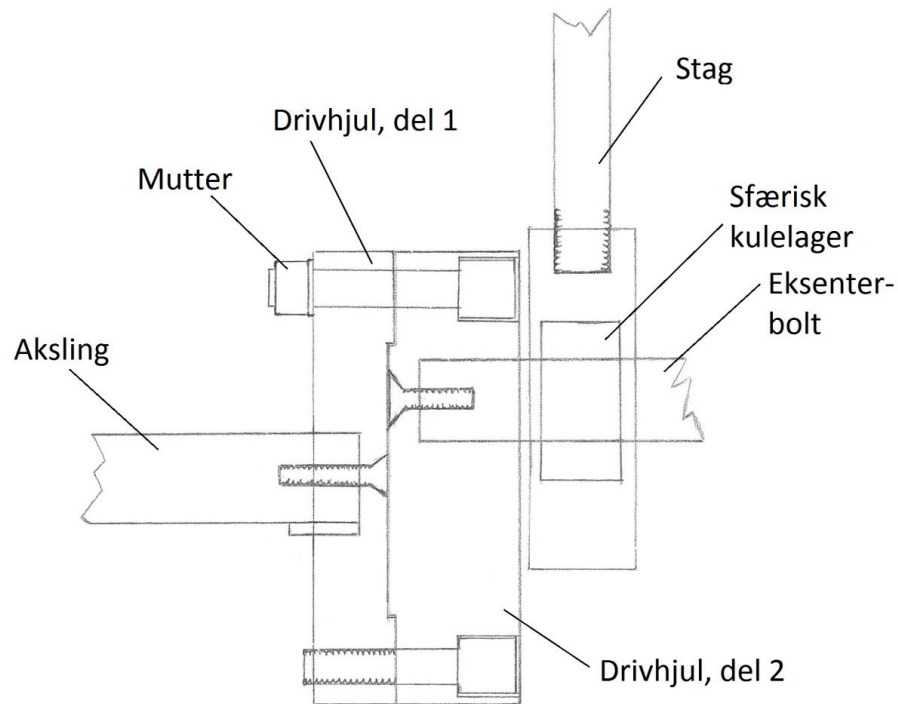
Etter åtte døgn i drift fikk eksenterbolten tilhørende Motor 1 brudd. Også kulelageret ble ødelagt. Etter bruddet lå metallstøv samt kuler fra kulelageret ved Motor 1. Figur 3.20 dokumenterer skadene.



Figur 3.20: Skadene på eksenterbolt og drivhjul tilhørende Motor 1.

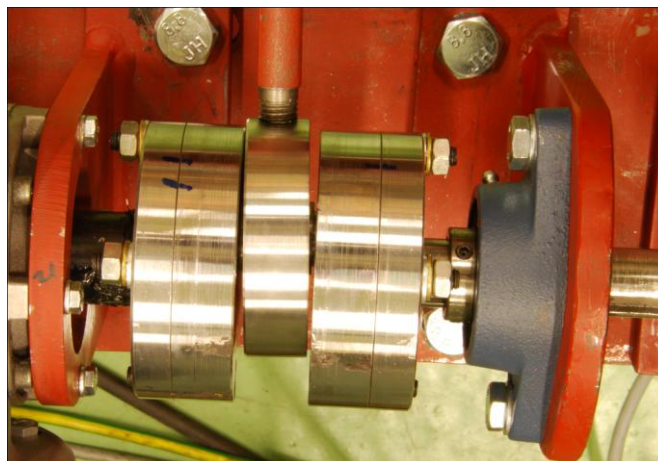
Før bruddet ble det observert at drivhjulene ikke holdt samme rotasjonshastighet. Antakelig har eksenterbolten blitt så skjev at metallskiven med kulelageret har kilt seg mellom drivhjulene og forårsaket bruddet på bolten. Begge drivhjulene og metallskiven i midten hadde store slitasjeskader grunnet friksjonen mellom metall mot metall.

En ny løsning for Motor 1 måtte utarbeides. Figur 3.21 viser en skisse av designet.



Figur 3.21: Skisse av designet til utbedring av drivhjulet til Motor 1.

Løsningen ble å la hvert drivhjul bestå av to metallskiver i stedet for én. Den ene delen var festet med en 6 mm forsenket skrue til akslingen, mens den andre delen var festet med en 6 mm forsenket skrue til eksenterbolten. Den ene metallskiven ble laget med en forsenkning i midten, og den andre med en forhøyning slik at de passet inn i hverandre. Fire forsenkede skruehull var boret i ytterkant av metallskivene slik at de kunne festes sammen. Et sfærisk kulelager ble benyttet, som kan beveges i flere retninger. Bevegeligheten til kulelageret reduserte påkjenningen av eventuelle skjevheter testtriggen hadde. Eksenterbolten var 20 mm tykk og ble plassert i 17 mm dype hull, og festet med en forsenket skrue på motsatt side av metallskivene. Dermed var problemet med et solid festepunkt for eksenterbolten løst samtidig som det gjorde monteringen enkel. Figur 3.22 og Figur 3.23 viser bilde av drivhjulet til Motor 1.



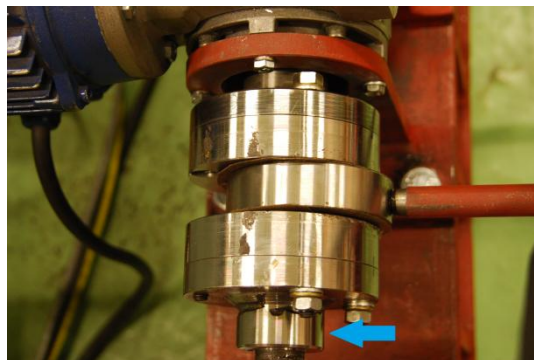
Figur 3.22: Modifikasjoner på drivhjulet til Motor 1.



Figur 3.23: Delene til drivhjulet til Motor 1.

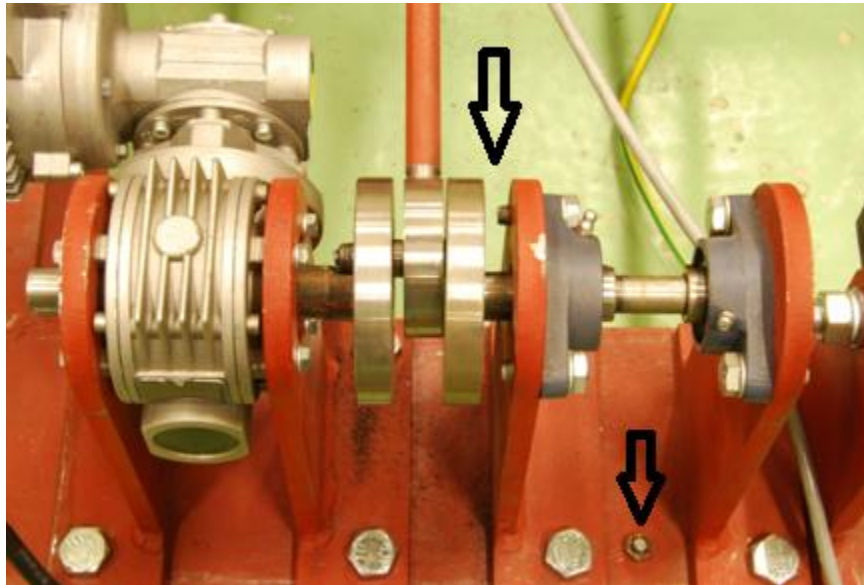
Et nytt svakt punkt i drivhjulemekanismen viste seg å være punktet der akslingen festes til drivhjulet. Kontaktflaten, eller føringen, mellom akslingen og drivhjulet var for kort, og kreftene på drivhjulet førte til brudd i festepunktet til akslingen. Løsningen ble å lage kontaktflaten større, slik at føringen ble lengre og mer stabil. Et metallrør tilpasset størrelsen til akslingen ble sveiset fast til drivhjulet. Pila i Figur 3.24 viser den forlengede føringen.

Langs akslingen mellom drivhjulet og motoren var det nødvendig å plassere en metallring for å hindre at avstanden mellom drivhjulet og motoren skulle bli for liten. For liten avstand ville gitt kontakt mellom festepunktene og ført til slitasjeskader. Under en inspeksjon av testtriggen etter forsøksperioden ble det observert at metallringen hadde delt seg i to og falt av akslingen. Gapet mellom drivhjulet og motoren er så lite at det nesten er kontakt. Før et eventuelt neste forsøk anbefales det å montere en ny metallring på akslingen.



Figur 3.24: Bilde av drivhjul med forlengt føring.

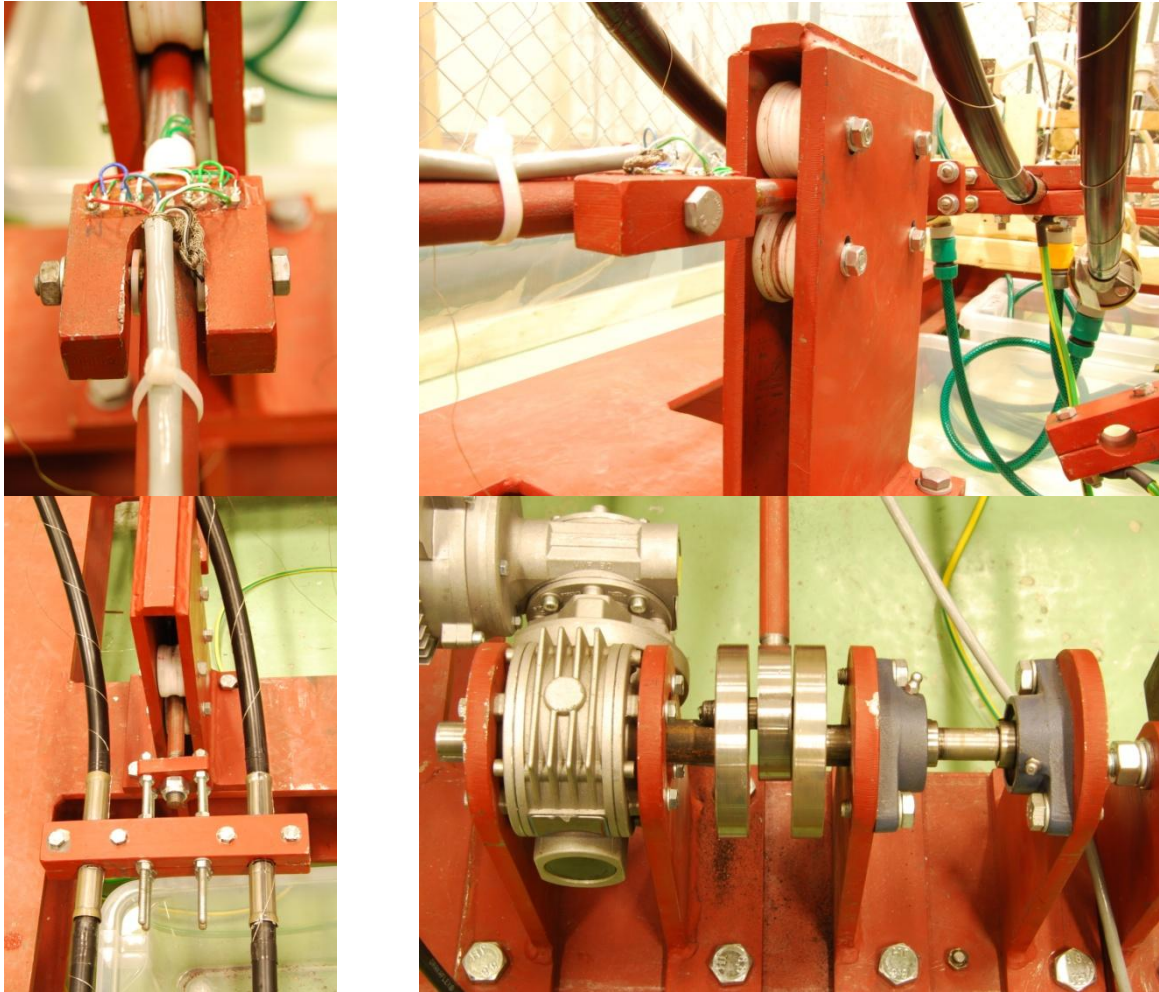
Eksenterbolten ved motor 2 fikk en skade etter 17 døgn i drift. Delen av eksenterbolten som var gjenget og festet med mutter fikk et brudd kant i kant med ytterkanten til drivhjulet. Skaden fikk ingen konsekvens for driften ettersom eksenterbolten beholdt sin opprinnelige posisjon. Figur 3.25 viser at den ene enden til eksenterbolten har knekt. Mutteren og den knekte delen ligger ved siden av. Til neste forsøk med testtriggen anbefales det å oppgradere drivhjulet til Motor 2 til en løsning tilsvarende som for motor 1.



Figur 3.25: Brudd på eksenterbolten til Motor 2.

Stag

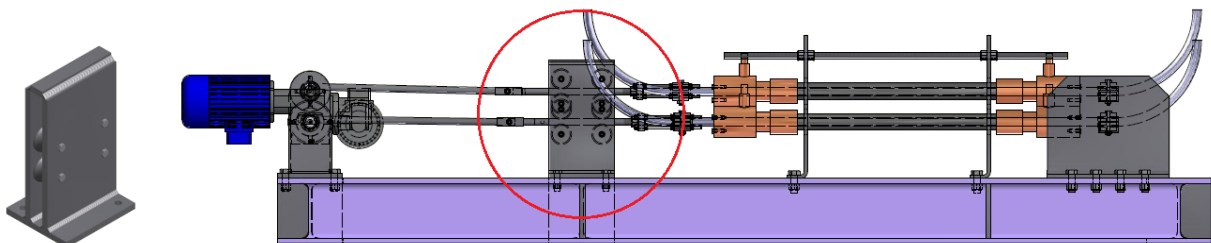
Staget overfører bevegelsen fra motoren og drivhjulet til kabelobjektet. Staget består av to deler. Den ene enden av staget er festet til metallskiven med kulelager, og den andre enden er festet til kabelobjektet. Et ledd kobler stagdelene sammen. Hensikten til leddet er at utslaget eksenterpinnen har i vertikalretning ikke skal påvirke retningen kabelobjektene strekkes. Kabelobjektene skal kun strekkes horisontalt. De to øverste bildene i Figur 3.26 viser bilder av stagleddet, og de to nederste bildene viser endene til staget med henholdsvis festepunktet til kablene til venstre og festepunktet for staget på drivhjulet til høyre.



Figur 3.26: Stagets ledd og endepunkter.

Støttebrakett

Mellom drivhjulet og festepunktet til kabelobjektet er det montert en støtte til staget, kalt støttebrakett. Figur 3.27 viser støttebraketten og dens plassering på testriggen. Støtten er montert på en tverrliggende bjelke, og består av fire hjul som skal støtte staget slik at stagets bevegelse er kontrollert. Bevegelsen skal kun virke horisontalt, fram-og-tilbake.

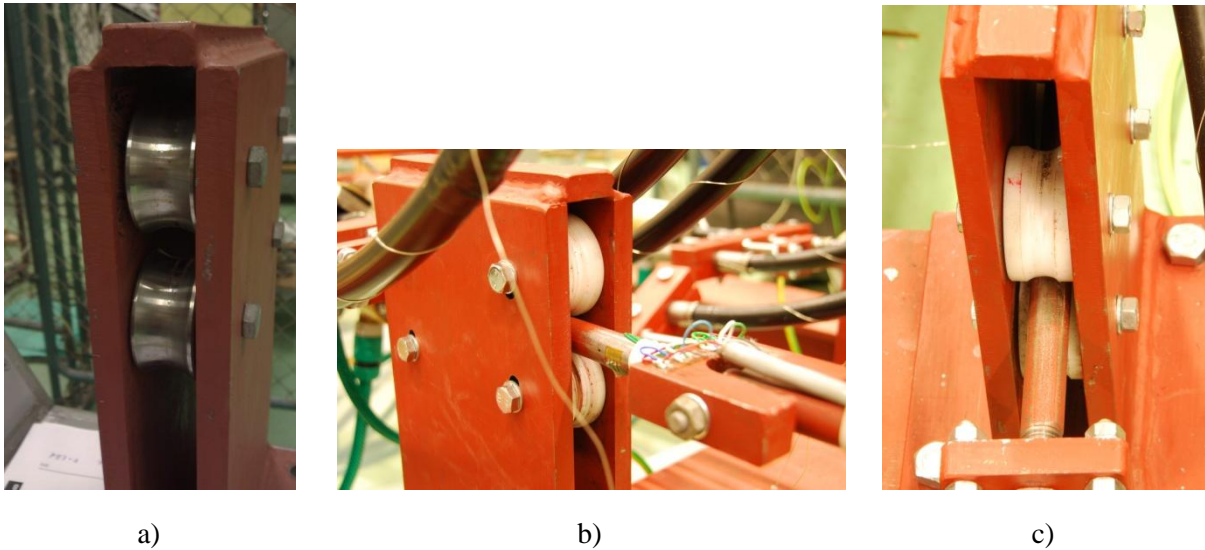


Figur 3.27: Tegning av støttebraketten og beskrivelse av plasseringen på testriggen.

Konstruksjonen av støttebraketten var ikke tilfredsstillende ved levering. Selve plasseringen av støtten var skjev i forhold til bevegelsesretningen til staget. Hjulene var av metall og montert uten kulelager, slik at slitasje ville blitt et problem. Bevegelsen til staget

var ukontrollert, fordi hjulene var for smale og ustabile. Dessuten gav ikke hjulene nok støtte til staget vertikalt ved at de var plassert for langt fra hverandre. Det var heller ikke mulig å justere plasseringen til hjulene. Følgende forbedringer ble derfor iverksatt:

- Oppfresing av spor slik at bevegelsesretningen til staget ble rett
- Nye og bredere hjul av plastikk med kulelager ble laget
- Oppfresing av spor slik at hjulene kunne justeres vertikalt



Figur 3.28: a) Original støttebrakett med metallhjul. b) Oppgradert støttebrakett med mulighet for justering av hjulene i vertikalretning. c) Plasthjulet i støttebraketten.

Strekk av kabelisolasjon

Lengden mellom to festepunkter i testtriggen er 100 cm. Til å beregne strekket benyttes følgende formel:

$$\varepsilon = \Delta L/L \quad (3.1)$$

der ε er strekkprosenten, ΔL er endring av kabellengden og L er kabellengden. Kabelobjektens strekkprosent, ε , ble valgt til 6 %. Begrunnelsen for valget av strekkprosenten har grunnlag i beregningene som er vedlagt i Appendiks 2.

$\varepsilon=6\%$ er en høy verdi og urealistisk i forhold til strekket en dynamisk kabel vil bli utsatt for i normal drift. Med ønske om å kunne sammenligne resultatene fra kablene i testtriggen med kablene fra eksperimentet med de bøyde kablene, falt valget på $\varepsilon=6\%$. Beregninger viste at det ytterste punktet på kabelen som var bøyd rundt et rør med rørdiameter lik 30 cm hadde en strekkprosent lik 6,3 %. Med tanke på at forsøksstiden ville være kort kan det ofte være lurt å bruke ekstreme verdier for å få resultater.

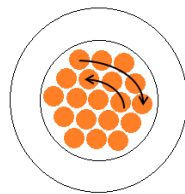
Kabelobjektene ble strammet slik at de ble strukket 3 cm, når motoren var av og eksenterbolten stod i posisjon 1, se Figur 3.13. Med stagets bevegelsesutslag på 3,0 cm vil også kabelisolasjonen strekkes like mye. Maksmalt strekk var 6 cm, som tilsvarer strekkprosenten $\varepsilon=6\%$.

Som nevnt vil $\varepsilon=6\%$ være en urealistisk belastning på en dynamisk kabel. Grunnen til det er at en dynamisk kabel vil ha en armering som tar opp krefter. Lederen i kabelen vil også ta opp noen av kreftene. Derfor var det nødvendig å fjerne lederen i den delen av kabelen som skulle strekkes, for i hele tatt og oppnå en så høy strekkprosent.

Uttrekking av lederen

Kabelobjektene til testtriggen kan minimum være 2 meter, med en optimal lengde på 3 meter. I en kabel utsatt for strekk vil kraften deles mellom lederen, isolasjonen og eventuell armering. For å være sikker på at isolasjonen skal bli utsatt for den totale strekkraften måtte lederen trekkes ut.

Lederen i kabelen består av 19 kordeler. En kordel er plassert i midten, deretter er to lag av kordeler tvunnet i hver sin roterende retning rundt senterkordelen. Figur 3.29 illustrerer dette.



Figur 3.29: Kabeltverrsnitt med rotasjonsretningene til kordelene.

Kabelen benyttet i eksperimentet er tripplekstrudert. Det betyr at indre halvleder er ekstrudert på de ytre lederkordelene. Store krefter må til for å trekke ut lederen fordi friksjonen mellom lederkordelene og indre halvleder er høy.

For å lage et festepunkt på lederen fjernes 20 cm av isolasjonen, slik at lederen blir fri. Lederen tres gjennom en metallplate med hull i senter tilpasset lederens tverrsnitt. I enden av lederen monteres et festepunkt. Til uttrekkingen av lederen benyttes en truck og en kran. Kabelen tres under i fra og opp gjennom øvre del av truckgaffelen slik at metallplata fungerer som motstand mot isolasjonen. Festepunktet i enden av kabelen festes til kroken på krana. Deretter heves krana slik at lederen trekkes ut av isolasjonen. Isolasjonen holdes igjen av metallplata. Et bilde av prosessen vises i Figur 3.30.



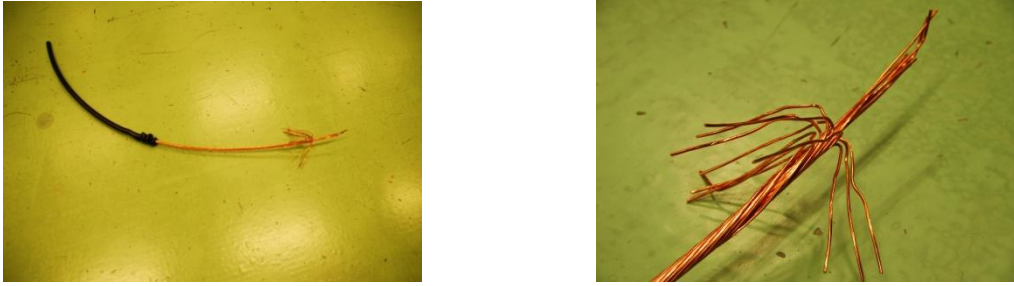
Figur 3.30: Prosessen hvor lederen trekkes ut av isolasjonen.

Det var usikkert om lederen kunne trekkes ut på 2-3 meter lange kabler fordi friksjonen mellom indre halvleder og kobberlederen ville være for stor. Det første forsøket ble utført med en 3 meter lang kabel. Figur 3.31 viser resultatet fra forsøket. Friksjonen mellom leder og halvleder er så stor at kreftene som drar lederen deformerer isolasjonen.



Figur 3.31: Deformert kabelisolasjon etter mislykket forsøk på å trekke ut lederen i en 3 m lang kabel.

Ettersom friksjonskrefter reduseres når kontaktflaten reduseres, var det håp om at reduksjon av kabellengden skulle være tilstrekkelig for å trekke ut lederen uten å skade isolasjonen. Det andre forsøket ble utført med en 2 meter lang kabel. Også denne gangen ble isolasjonen deformert. En ide var å trekke ut de indre kordelene først og deretter trekke ut det ytterste kordellaget i håp om at det skulle gå lettere. Tanken var at friksjonen kanskje var lavere mellom kobber og kobber i forhold til kobber og plast. Derfor ble festepunktet montert på det nest innerste kordellaget. Kreftene ble også denne gangen for store. Flere av kordelene fikk brudd. Figur 3.32 viser resultatet.



Figur 3.32: Deformert kabelisolasjon og brukkne kordeler etter mislykket forsøk på å trekke ut lederen i en 2 m lang kabel.

En måte å redusere friksjonsfaktoren på er å smøre overflatene med olje. Dersom lederkanalen kan fylles med olje vil forhåpentligvis lederen slippe taket fra halvlederen, uten at kreftene deformerer isolasjonen. Problemet var å få fylt lederkanalen med olje.

En metode ble utviklet bestående av en hydraulikkslange, gummikork og luft med høyt trykk. Hydraulikkslangen ble festet med en rørklamme på enden av kabelen. Olje ble fylt oppi hydraulikkslangen. Gummikorken stengte igjen åpningen av hydraulikkslangen og har et hull stort nok til høytrykk-luftpistolen. Trykket fra luftpistolen presset oljen gjennom lederkanalen. Figur 3.33 viser oppsettet til metoden.



Figur 3.33: Metoden for fylling av olje i lederkanalen.

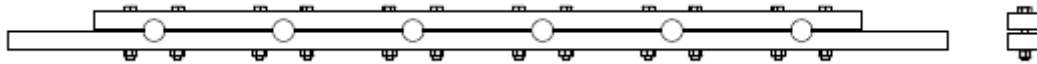
Tiden det tok før oljen ble presset gjennom en 3 meter lang kabel var omtrent 20 minutter. Med lederkanalen fylt med olje kunne lederen trekkes ut uten antydning til skade på isolasjonen, selv på en 3 meter lang kabel.

Kobberlederen ble ikke trukket helt ut av isolasjonen, men i den delen der isolasjonen skulle strekkes ble lederen fjernet. Den resterende delen av lederen kunne brukes som festepunkt.

Kabelen ble skylt med vann for å fjerne noe av oljen. Vann ble presset gjennom kabelen med høyt trykk på tilsvarende måte som da oljen ble presset igjennom. Vannskyllingen ble utført tre ganger per kabelobjekt.

Festepunkter

Figur 3.34 viser festeanordningen til kablene i den dynamiske testriggen. Figuren til venstre illustrerer anordningen sett rett forfra, mens figuren til høyre illustrerer anordningen sett fra siden.

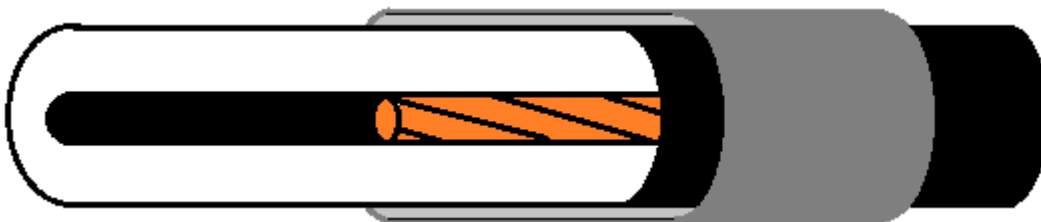


Figur 3.34: Skisse av festepunktene til kabelobjektene i testriggen.

Festeanordningen på testriggen er laget av stål, og ville skadet kabelisolasjonen dersom kabelen hadde blitt festet direkte til riggen. Kabelen kan i verste fall rives i stykker på grunn av skarpe og uslipte kanter. Det ble derfor besluttet å lage festepunkter utenpå kabelisolasjonen.

Festepunktene består av 10 cm lange stålrør. Rørene ble klemt fast utenpå kabelens ytre halvleder. Arbeidet krevde spesialutstyr, og ble utført hos GS Hydro [22]. Rørdiameterens originale dimensjonen var 25 mm, og etter fastklemmingen var diameteren 22,0 mm.

To metoder ble benyttet for å unngå at kabelkanalen ble klemt sammen under monteringen av stålrørene. Tomrommet fra lederen måtte fylles med et materiale slik at vann kunne trenge igjennom uten at kabelkanalen ble sammenklemt. Den ene metoden bestod av å beholde lederen i den ene enden av kabelobjektet, se Figur 3.35. Uttrekkingen av lederen ble utført på en kontrollert måte slik at posisjonen til enden av lederen kunne bestemmes. Før uttrekkingen ble lederen slipt ned slik at den ikke hadde skarpe kanter.



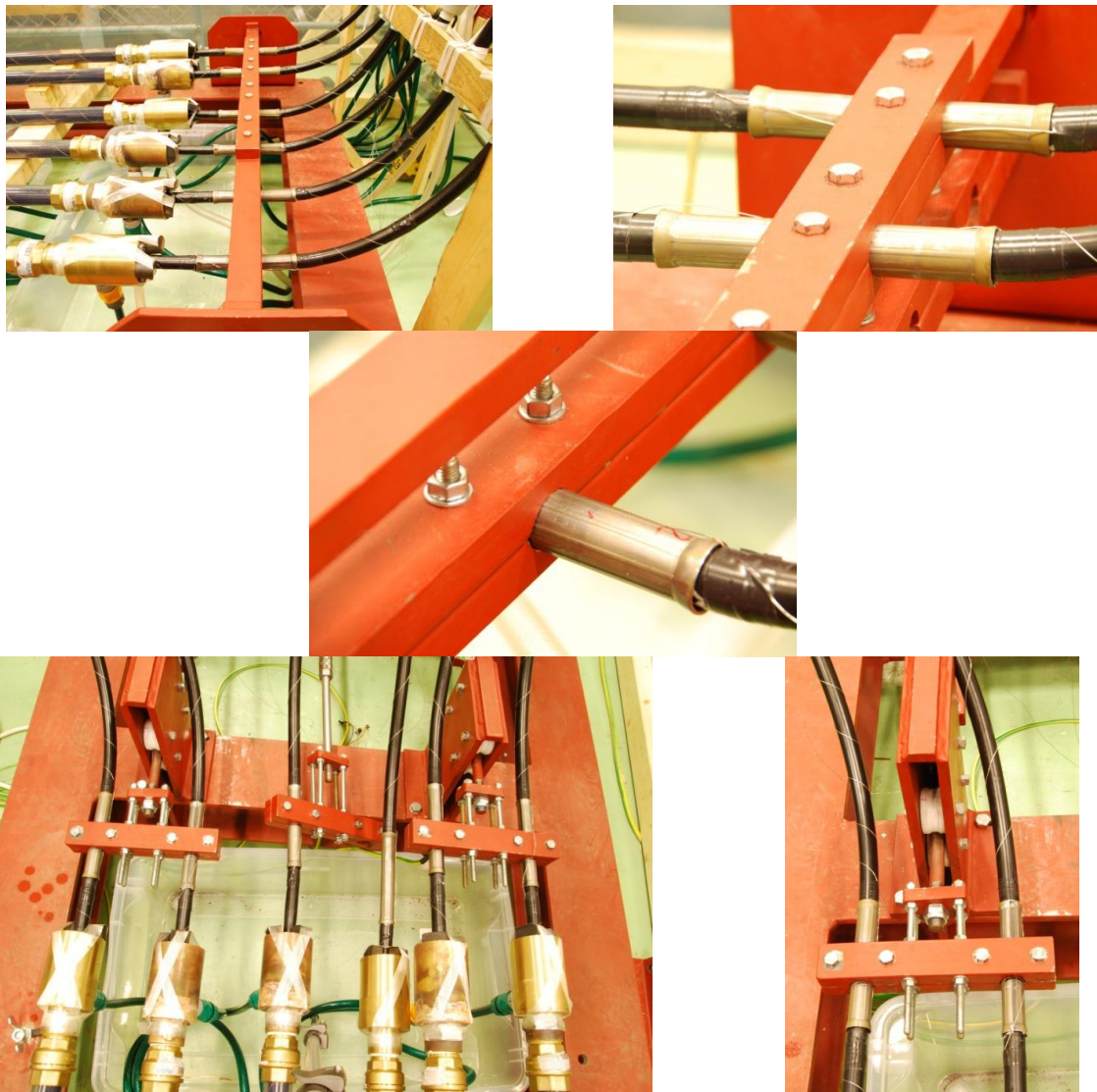
Figur 3.35: Festepunkt med kobberleder.

Den andre metoden bestod av å plassere et rustfritt stålrør i kabelkanalen akkurat på innsiden der stålrøret skulle klemmes på utsiden, se Figur 3.36. Det indre stålrøret har et hull tvers gjennom senter av røret. Hullet skal sørge for at vann i kabelkanalen fritt kan passere festepunktet. Stålrørets diameter er 10 mm.



Figur 3.36: Festepunkt med rustfritt rør i lederkanalen.

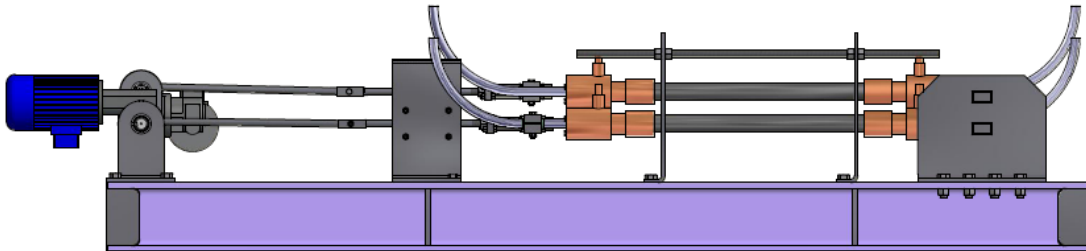
Figur 3.37 viser bilder av festepunktene i den dynamiske testriggeren. De tre øverste bildene er av festepunktene plassert på motsatt side av motorene. De to nederste bildene viser festepunktene nærmest motorene.



Figur 3.37: Festepunktene til kabelobjektene på testriggeren.

Vannfordelingssystem

For at vanntrær skal initieres og vokse må kabelen være omgitt av et fuktig miljø, samtidig som den blir påtrykt spenning. I det eksperimentelle oppsettet skulle kun den delen av kabelen som strekkes være under vann. Testriggeren skulle være tørr. For å oppnå dette ble et plastrør monteres på utsiden av hver kabel. Figur 3.38 viser testriggeren sett fra siden. Plastrøret befinner seg mellom messinghylsene som er kobberfarget i figuren.



Figur 3.38: Testrigger sett fra siden.

Messinghylse

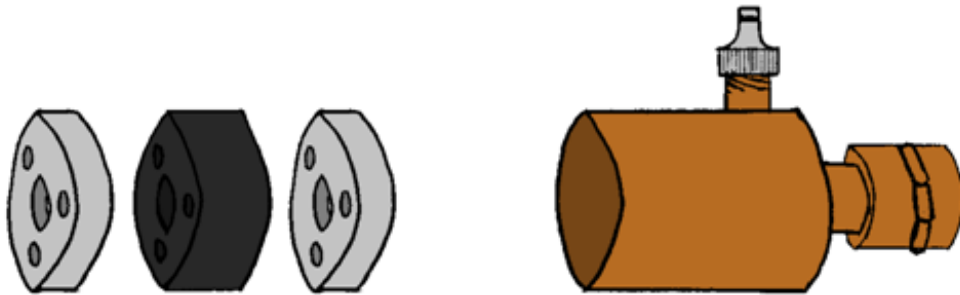
Messinghylsene monteres på røret for å dekke rørets åpne ende. Figur 3.39 viser et bilde av messinghylsen. En gummipakning er plassert mellom to messingdeler som er gjenget, slik at gummipakningen presses ut når messingdelene skrues sammen. Når plastrøret er plassert på innsiden av messingingen og gummipakningen presses ut, vil røret feste seg. Messingdelene med gummipakningen er vist med rød pil i figuren.



Figur 3.39: Messinghylsen.

Figur 3.40 viser løsningen for å tette enden av messinghylsen der kabelen stikker ut. En gummipakning plassert mellom to metallskiver monteres sammen med tre skruer. Hullene i metallskiven til høyre i figuren er gjenget. Når skruene strammes vil metallskivene presses mot hverandre og klemme gummipakningen sammen. Gummien lager en vanntett forsegling mot hylseveggen og kabelen. Hullet i midten av metallskivene og gummipakningen gir plass til kabelen. Diameteren på skivene er mindre enn den indre diameteren til messinghylsen, slik at skivene passer på innsiden av hylsen. Glassfibeiteip og gummibiter sørger for å holde metallskivene og gummipakningen på plass, vist med svart pil i Figur 3.39.

Vann kan fritt flyte mellom messinghylsene på hver side av plastrøret. På hver messinghylse er det montert en krankobling, vises som grå tapp i Figur 3.40.



Figur 3.40: Skisse som illustrerer delene som tetter den åpne enden av messinghylsen.

Vannet utenpå kablene skulle holde 30 °C. Til det krevdes et vannfordelingssystem bestående av en vanntank med et varmeelement og en pumpe som fordelte vannet. Figur 3.41 viser bilde av vannfordelingssystemet.



Figur 3.41: Vannfordelingssystemet, vanntank og varmeelement til venstre, og pumpe og vannfordeler til høyre.

Varmeelement

Varmeelementet gir maksimal effekt på 2050 W, og er selvregulerende. Figur 3.42 og Figur 3.43 a) viser bilde av varmeelementet bestående av et hus med elektronikk og panel for brukerinnstillinger, som gjør det mulig å stille inn ønsket temperatur. Under huset finnes en varmekolbe og en bryter koblet til et flytelement. Varmeelementet ble plassert på toppen av en 10-literstank med vann. Dersom vannstanden i tanken skulle bli for lav vil flytelementet synke og effekten kobles ut.



Figur 3.42: Varmeelementet.

Pumpe og vannfordeler

Fra tanken går en vannforsyningslange til en MEEC sirkulasjonspumpe, se Figur 3.43 b). Pumpa har tre effekttrinn, henholdsvis 55 W, 70 W og 100 W. Vannet pumpes ut i en spesielt designet vannfordeler, som er vist i Figur 3.43 c). Hensikten med designet til fordeleren er å få lik volumstrøm i alle vannslangene. Fordeleren består av et sylindermformet kammer med tre hull. Hullene er plassert symmetrisk med 120 grader mellom hverandre. En to-veis krankobling med mengdejustering er koblet til hvert av de tre hullene. Vannslanger ble koblet mellom krankoblingen på vannfordeleren og den ene messinghylsen med vanlige hurtigkoblinger. En vannslange gikk fra den andre messinghylsen tilbake til vanntanken. Temperaturen ble målt ved utgangen til rørene for å kontrollere at ingen av rørene hadde dårlig gjennomstrømning.



a)



b)



c)

Figur 3.43: a) Bryterpanelet til varmeelementet. b) MEEC sirkulasjonspumpe. c) Vannfordeleren.

Vann i leder

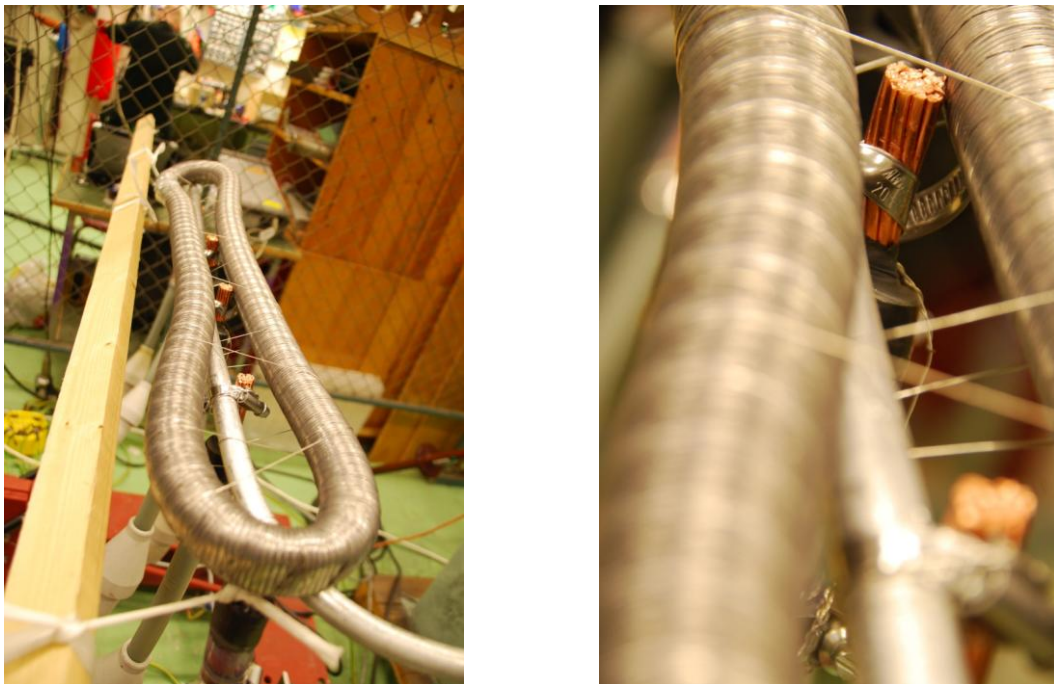
Lederkanalen i kablene ble fylt med vanlig springvann. Figur 3.44 viser løsningen for å unngå fordampning av vannet, og for enkel etterfylling av vann i lederkanalen.



Figur 3.44: Løsning for å unngå fordampning av vannet og for enkel etterfylling av vann i lederkanalen

Spenningsstilkobling

Spenningskilden ble koblet til kablene i den enden av kabelobjektet som fremdeles inneholdt ledere. Et aluminiumsrør ble koblet fra trafoen og festet til alle lederne med rørklammer, som en samleskinne. Figur 3.45 viser bilder av tilkoblingen.

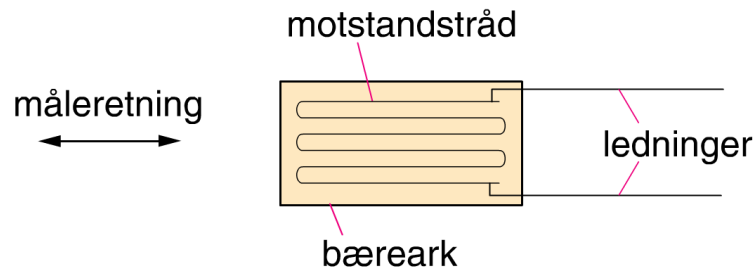


Figur 3.45: Tilkoblingspunktet til spenningskilden på kabelen.

Logging av strekkrefter

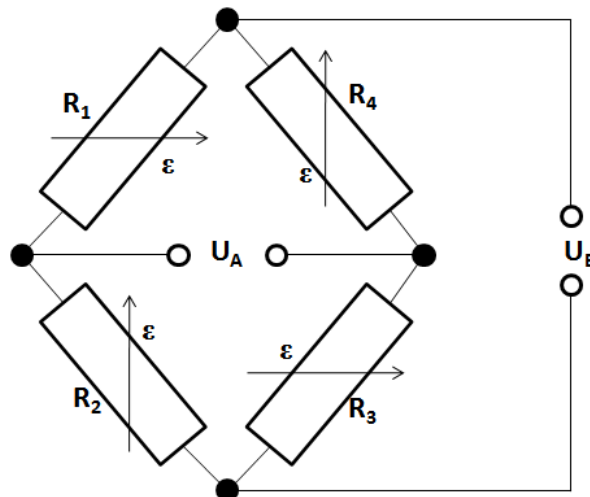
For å måle strekkreftene kabelobjektene utsettes for, ble det montert strekkklapper på stagene. Strekkklapper er laget av tynne metalltråder, og de benyttet i eksperimentet har to sett av motstandstråder på samme bæreaks, som muliggjør målinger av kreftene både

vertikalt og horisontalt. Figur 3.46 viser elementene i en strekkklapp. Figur 3.48 a) viser bilde av strekkklappen.



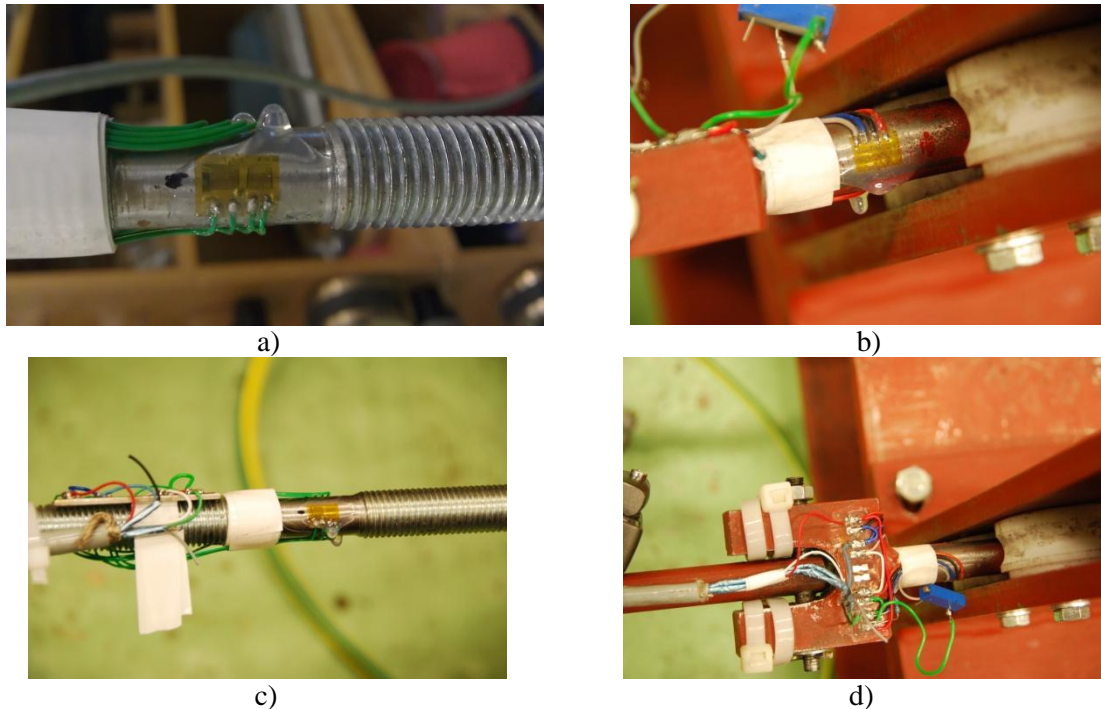
Figur 3.46: Skisse av en strekkklapp.

Motstanden i metalltrådene er kjent når den er ubelastet. Når materialet strekkklappen er festet til strekkes, strekkes også trådene i strekkklappen og motstanden i tråden endres. I dette eksperimentet ble to strekkklapper festet på hver side av stagen med 180 graders mellomrom, se Figur 3.48 b) og Figur 3.48 c). Ledningene til motstandstrådene ble koblet i en bro slik Figur 3.47 viser og Figur 3.48 d) viser bilde av brokoblingen. Pilene over motstandene i Figur 3.47 angir retningen belastningen måles. En spenningskilde setter spenning på inngangen av broen, U_A , og signalet til utgangsspenningen, U_E , logges. På den måten måles endringen av motstanden i motstandstrådene. Forholdet mellom inngangsspenningen og utgangsspenningen brukes til å beregne kraften som utgjorde motstandsendingen. Utregningen krever kjennskap til egenskaper og dimensjon til materialet strekkklappen er festet på. Signalet er lite, i millivolt (mV) størrelse, og er følsomt for støy. Kun små forstyrrelser skal til for at måleresultatet blir feil.



Figur 3.47: Brokobling av strekkklappene.

Metall krymper når det blir avkjølt, og utvider seg når det varmes opp. Strekkklappene er så følsomme at endringen i temperatur vil registres som strekk eller kompresjon. Brokobling benyttet i eksperimentet kompenserer for temperaturendringer og for krefter i vertikallretning. Det er kun kreftene i bevegelsesretningen, den horisontale retningen, som er interessant å måle.



Figur 3.48: a) Strekkklappen. b) Plasseringen av strekkklappen på staget brukt til dynamisk mekanisk strekk av kableen. c) Strekkklappen montert på staget brukt til statisk mekanisk strekk av kableen. d) Brokoblingen.

3.3 Vanntrealdring

3.3.1 Forberedelser av kabelobjekt

Før kablene påtrykkes spenning, og vanntrealdringen kan begynne, må kabelobjektene forberedes. For å hindre overslag og partielle utladninger (PD-utladninger) i kabelendene er det viktig å lage endeavslutninger.

Endeavslutning

Å lage en endeavslutning består av å fjerne ytre halvleder fra kabelenden og montere stresskone (eng. stress cone).

Ytre halvleder fjernes med et spesiallaget verktøy, kalt kabelskreller. Verktøyet festes utenpå kableen. Når verktøyet dreies rundt vil en justerbar kniv skjære av det ytterste laget av isolasjonen, og skrelle av ytre halvleder. Den ytre halvlederen må fjernes et godt stykke inn på kableen, 30-40 cm. Det er viktig at ingen rester av ytre halvleder blir værende igjen på den delen som er skrellet. Eventuelle rester vil kunne bidra til PD-utladninger.

For at det ikke skal bli feltforsterkninger i overgangen mellom isolasjonen og ytre halvleder, må overgangen være rett. Ofte brukes en halvledende lakk for å få overgangen helt rett.

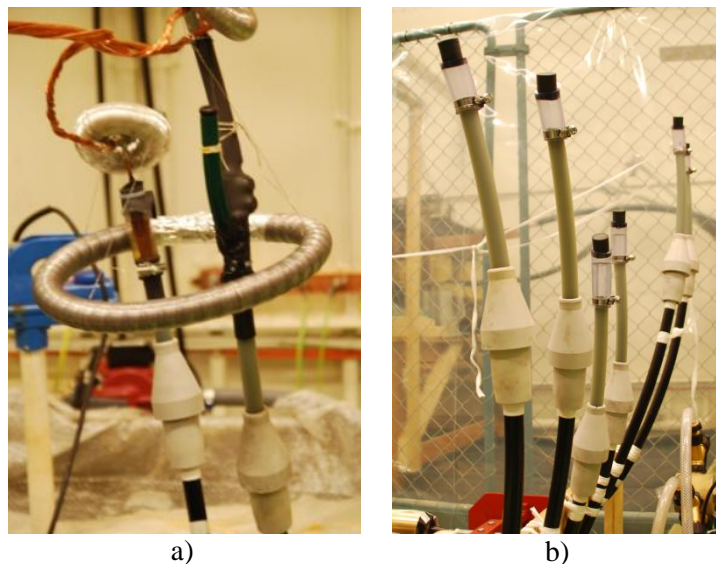
Figur 3.49 b) viser endeavslutninger. Bildet viser at ytre halvleder er fjernet ved enden av kabelen.

En stresskone består av en halvledende elektrode som har kontakt med kabelens ytre halvleder. Utenpå elektroden er det et isolerende materiale. Utformingen av stresskonene bidrar til fordeling av det elektriske feltet ved endeavslutningen [12, 23].

Stresskone presses på utsiden av kabelen slik at den halvledende elektroden får kontakt med ytre halvleder i overgangen mellom isolasjon og ytre halvleder. Fett eller silikon må benyttes under monteringen for å hindre at konen blir skadet, og for å hindre at små luftbobler dannes i grensesjiktet mellom stresskone og kabelen.

Figur 3.49 viser formen til stresskonene. Bildene illustrerer også plasseringen til stresskonene i overgangen fra isolasjon til ytre halvleder.

Rundt alle skarpe kanter i kretsen vil koronaeffekten kunne oppstå. Koronaeffekten består av små elektriske utladninger i luften rundt de skarpe kantene, og er en uønsket effekt. Derfor monteres koronaringer rundt alle skarpe kanter som kan ha høyt elektrisk felt under spenningspåkjenningen. Koronaringerne er ledende og på grunn av sin form avrunder den feltet slik at feltforstrekningene uteblir. Figur 3.49 a) viser to koronaringer, én rundt enden av lederne og én ved festet til kobberspikeren som er koblet til spenningskilden.



Figur 3.49: a) Endeavslutninger montert med stresskoner og koronaringer. b) Endeavslutningen til kabler på motsatt side av spenningspåkjenningen montert med stresskoner.

3.3.2 Elektrisk påkjenning

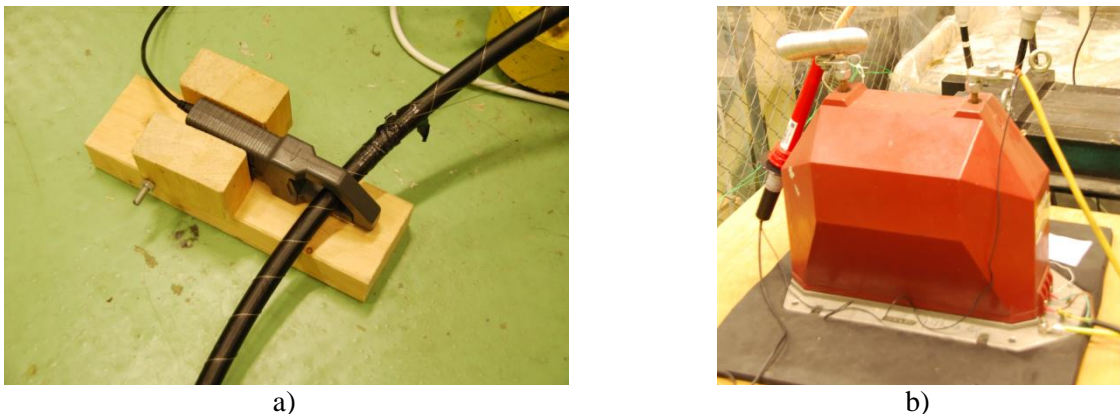
Kablene ble påtrykt en spenning tilsvarende $2U_0=13,85$ kV. Det tilsvarer en gjennomsnittlig elektrisk feltpåkjenning på 3 kV/mm. Når lederen vil feltpåkjenningen være størst, $E_{\max}=5,5$ kV/mm. Ved ytre halvleder vil feltstyrken være lavest, $E_{\min}=1,6$ kV/mm. E_{\min} er

høyere enn den laveste feltstyrken som er påvist å gi vanntrevekst jf. delkapittel 2.4.2 om Elektrisk felt.

3.3.3 Overvåkning

Strøm, spenning og temperatur ble overvåket under eksperimenttiden til forsøket med bøyde PEX-kabler. Strømmen i kabelobjektet ble målt med ei strømklype koblet til et multimeter, se Figur 3.50 a). Spenningen ble målt med en probe som var koblet til spennings siden og jord, se Figur 3.50 b). Et multimeter, plassert inne i høyspenningscella, viste spenningsverdien. Temperaturen i vannet og på utsiden av kabelens ytre halvleder ble målt av temperaturelementer koblet til en datalogger.

Spenning, strekkrefter, driftstid og temperatur ble overvåket under forsøket med den dynamiske testtriggen. Styrepulten brukt i forsøket var digital og viste spenningsverdien. Verdien ble dobbeltsjekket ved å måle spenningen med en probe. Styrepulten inneholdt også en timeteller som logget driftstiden med spenningspåtrykk. Strekkreftene ble målt med strekkklapper og logget av en datalogger (se mer informasjon i kapitlet; Logging av strekkrefter, s. 38). Vanntemperaturen ved utgangen til vannet i plastrøret ble målt med temperaturelement koblet til en datalogger.



Figur 3.50: a) Strømklypa til strømmåling. b) Proben (til venstre) til spenningsmåling koblet til trafoen.

3.4 Mikroskopanalyse

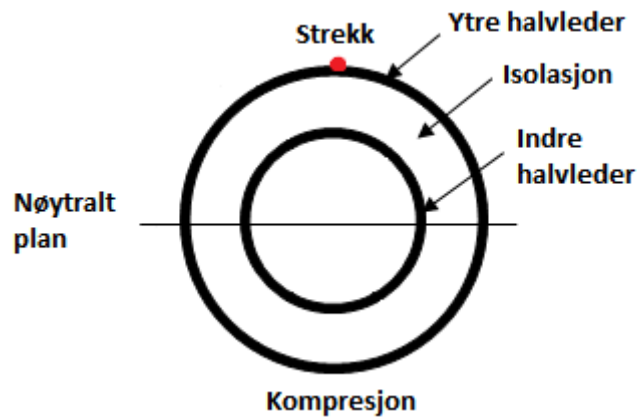
Vantrærne ble studert i mikroskop. For at vantrærne skal synes må tynne snitt av isolasjonen farges.

3.4.1 Forberedelse av kabelisolasjon til mikroskopanalyse

Merking av strekksone

For å kunne skille mellom hvilke deler av kabelisolasjonen som var blitt utsatt for strekk og kompresjon, ble det laget et snitt i ytre halvleder langs ytterkanten der strekket var

størst. Snittet ble laget før kabelen ble demontert fra rørene. Snittet er markert med rødt i Figur 3.51. På den rette kabelen i Figur 3.52 ser man snittet (markert med rød pil).



Figur 3.51: Soneinndelingen i snittet av kabelisolasjonen.

Uttrekking av leder

Før isolasjonen kan farges må isolasjonen kuttes i tynne snitt. Lederen må fjernes før isolasjonen kan kuttes. På verkstedet finnes det nødvendige verktøy for fjerning av leder og for spiralisering av kabelisolasjonen. Uttrekkingen av lederen foregår slik det ble beskrevet på side 30. Lengden på prøveuttakene er kort slik at deformering av isolasjonen ikke er noe problem.

Spiralisering

Isolasjonen ble plassert i en dreibenk, og snittet av en kniv mens kabelen roterte. Kabelisolasjonen ble spiralisert. Hele spiralen hadde lik tykkelse på 0,4 mm. Fordelen med å bruke denne metoden er at det går raskt å kutte opp større lengder med isolasjon. Alternativet ville vært å bruke en mikrotom der man kutter ett og ett snitt.



Figur 3.52: Spiralisert kabelisolasjon.

Innfarging

Isolasjonen ble farget av en blanding med metylenblått i henhold til CIGRE-metoden. En passende spirallengde ble festet til en ring av ståltråd. På den måten sikres god avstand mellom isolasjonen slik at fargen får kontakt med hele overflaten til spiralen. Flere ringer av ståltråd lages samtidig og farges i samme fargeløsning. Figur 3.53 viser isolasjon som er klar til innfarging.



Figur 3.53: Isolasjon klar til innfarging.

Etter innfargingen må isolasjonen skylles godt og tørkes. Styrken på fargeløsningen avtar med antall innfargingen. Innfargingstiden kan derfor være vanskelig å beregne. Det kan føre til enten for mørkt farget isolasjon eller for lys. For mørkt farget isolasjon gjør det krevende å skille vanntrær og andre mørke partikler i isolasjonen. En for lys farget isolasjon fører til at vanntrærne ikke synes. Hvis fargen på isolasjonen er akseptabel, er isolasjonen klar til analyse i mikroskopet. Figur 3.54 viser bilde av en farget spiral av isolasjon.



Figur 3.54: Innfarget isolasjon.

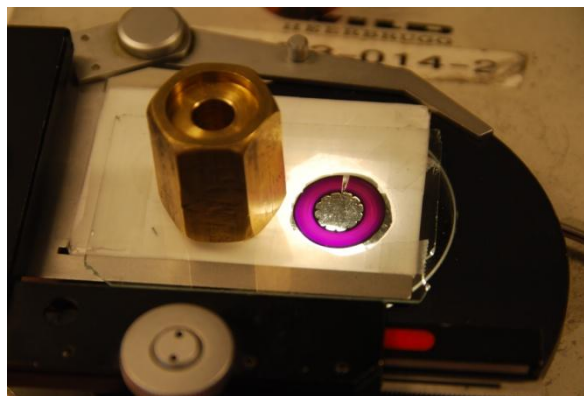
3.4.2 Utførelse av mikroskopanalyse

Et stereomikroskop ble benyttet for å analysere isolasjonssnittene, se Figur 3.55. Øyelinsen har en måleskala, slik at lengden av vanntrærne kan måles. 250 gangers forstørrelse ble benyttet til detektering og måling av lengden til vanntrærne.



Figur 3.55: Stereomikroskopet.

I mikroskopet studeres ett og ett snitt av isolasjonen, se Figur 3.56. Snittene oppnås ved å dele spiralene på langs. Lengden av det lengste bowtie-treet og det lengste ventilerte treet ble målt i hvert snitt. I kablene utsatt for statisk strekk og kompresjon med soneinndeling, se Figur 3.51, ble den maksimale lengden til trærne målt i hver sone. Antallet vanntrær i hvert snitt og sone ble også registrert.

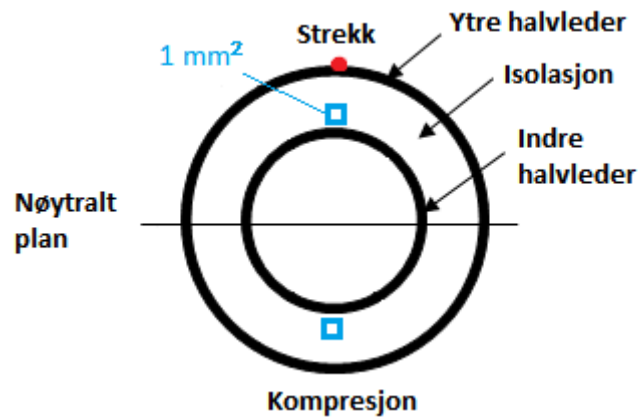


Figur 3.56: Et snitt av kabelisolasjonen under linsen i mikroskopet.

For å fjerne overflatestrukturen på snittet kan dimethyl phthalate brukes, et blankt kjemikalie. Når snittet dyppes i væsken får det en glatt overflate, slik at det er enklere å se vanntrærne. Bruk av væsken er tidkrevende. Dimethyl phthalate ble brukt til detektering av bowtie-trær i mikroskopanalysen. Deteksjonsgrensen var $30 \mu\text{m}$. Ventilerte trær er større og lettere å detektere, derfor var ikke bruken av dimethyl phthalate nødvendig.

Ekstrem stor tetthet av bowtie-trær ble observert i kablene aldret med temperaturgradient. Å telle antallet trær ville vært en umulig oppgave. I stedet ble antallet bowtie-trær i 1 mm^2

talt. Tilnærmet samme område i hver sone av snittet ble undersøkt. Områdene er merket med blått i Figur 3.57. Lengden av det lengste treet i sonen ble målt, tilsvarende som i den andre metoden. Med all fokus på et så lite område var det lettere å detektere små trær. Deteksjonsgrensen var derfor lavere i denne delen av analysen ($\sim 15 \mu\text{m}$).



Figur 3.57: Områdene merket med blått ble undersøkt for bowtie-trær.

Noen vanntrær er så store at de kan observeres i flere snitt. Under analysen var det fokus på et tre ikke ble talt flere ganger.

3.5 Statistisk presentasjon

Store vanntrær kan redusere holdespenningen til kabelen [1, 20]. I hovedsak er det derfor ventilerte vanntrær som reduserer kabelens levetid. Liten vekst av ventilerte vanntrær i noen av kablene gjorde det vanskelig å få nok grunnlag til pålitelige resultater. Bowtie-trær er sjelden årsak til elektrisk trevekst og gjennombrudd, men blir likevel analysert i denne oppgaven. Veksten av bowtie-trærne er stor. Det gjorde det lettere å få godt datagrunnlag til resultater. Selv om bowtie-trærne vanligvis ikke er noen trussel for kabelens levetid, kan veksten av bowtie-trær gi en antydning av veksten til de ventilerte vanntrærne i samme kabel. Ved å sammenligne veksten av bowtie-trær i kabler aldret med forskjellige betingelser og studere forskjellen i tetthet og lengde kan det gi nyttig informasjon.

3.5.1 Estimering av maksimal vanntre lengde med bruk av ekstremalverdistatistikk

Lengden til det lengste treet, l_{\max} , i hvert snitt vil variere og kan behandles som en stokastisk variabel med gjennomsnittsverdi, $\overline{l_{\max}}$, og standardavvik s [24]. Hvis distribusjonsfunksjonen til l_{\max} er kjent, kan den brukes til å anslå sannsynligheten for å finne et vanntre større enn en kritisk lengde, x , i en gitt kabellengde. Sannsynlighetsfordelingen til det lengste treet i hvert snitt, l_{\max} , er:

$$P(l_{\max} < x) = W(x) = \exp \left[- \left(\frac{w - x}{w - v} \right)^\beta \right] \quad -\infty < x \leq w \quad (3.2)$$

der P er sannsynligheten og v og β er parametre i sannsynlighetsfordelingen. Parametrene kan bestemmes fra analyseverdiene av l_{\max} , hvor v er 36,8 %-verdien og β er tall for spredningen.

For en gitt kabellengde, L , kan man beregne sannsynligheten for at lengden av det lengste treet er større enn x -verdien:

$$\varphi(x) = 1 - W(x)^{L/L_0} \quad (3.3)$$

der L_0 , analysert isolasjonslengde, er kabellengden $W(x)$ representerer.

En nærmere beskrivelse av ekstremalverdistatistikk og måten formlene brukes på finnes i Appendiks 4.

3.5.2 Gjennomsnittlig maksimal lengde

Gjennomsnittlig maksimal lengde, $\overline{l_{\max}}$, representerer gjennomsnittet av lengden til de lengste trærne funnet i hvert snitt. $\overline{l_{\max}}$ presenteres for hver kabel som ble analysert med hensyn til type tre og eventuell soneplassering. Av praktiske grunner presenteres $\overline{l_{\max}}$ noen ganger som $l_{av,\max}$.

3.5.3 Forekomst av vanntrær per centimeter kabelisolasjon

Antall vanntrær ble registrert i hvert snitt av kabelisolasjonen under analysen. Inspisert isolasjonslengde er forskjellig fra kabel til kabel. Antallet vanntrær funnet i hver kabel kan derfor ikke sammenlignes med hverandre. For å lage et sammenligningsgrunnlag ble antall trær dividert med lengden av isolasjonen som ble inspisert. n [cm^{-1}] viser forekomsten av vanntrær per centimeter kabelisolasjon.

Unntaket er forekomsten av bowtie-trær i kablene aldret med temperaturgradient. Siden analysen ble gjennomført på en annen måte presenteres forekomsten av bowtie-trærne per kubikkmillimeter isolasjon, n [mm^{-3}]. Alternativt kunne antallet bowtie-trær i den inspiserede kvadratmillimeteren (mm^2) multipliseres med tverrsnittsarealet og gi en slags gjennomsnittsverdi av vanntreforekomsten. Men en verdi basert på volum ble valgt som den antatt beste måten å presentere det på.

Selv om både n [cm^{-1}] og n [mm^{-3}] representerer forekomst av vanntrær per volumenhet, er ikke verdiene sammenlignbare.

3.5.4 Grafisk fremstilling med prosentvis vekstfordeling

Som alternativ til å presentere forekomsten av trær per cm isolasjon og for tydeligere å vise effekten av strekk- og kompresjonskreftene presenteres forekomsten av trær som prosentandelen av trær i henholdsvis strekk- og kompresjonssone.

3.5.5 Annet

For å presentere andre parametre hvor strekk- og kompresjonskreftene ikke har betydning, slik som aldring med og uten temperaturgradient og aldring ved ulik vanntemperatur, fjernes soneinndelingen og presentasjonen blir foretatt med det totale antallet vanntrær i snittene.

4 Resultater

Dette kapitlet presenterer resultatene fra mikroskopanalysen. Det meste av resultatene er presentert med grafer og figurer. Verdiene som er brukt i presentasjonen er vedlagt som tabeller i appendiks. Der det er antatt nødvendig skrives en liten oppsummering ved slutten av et tema.

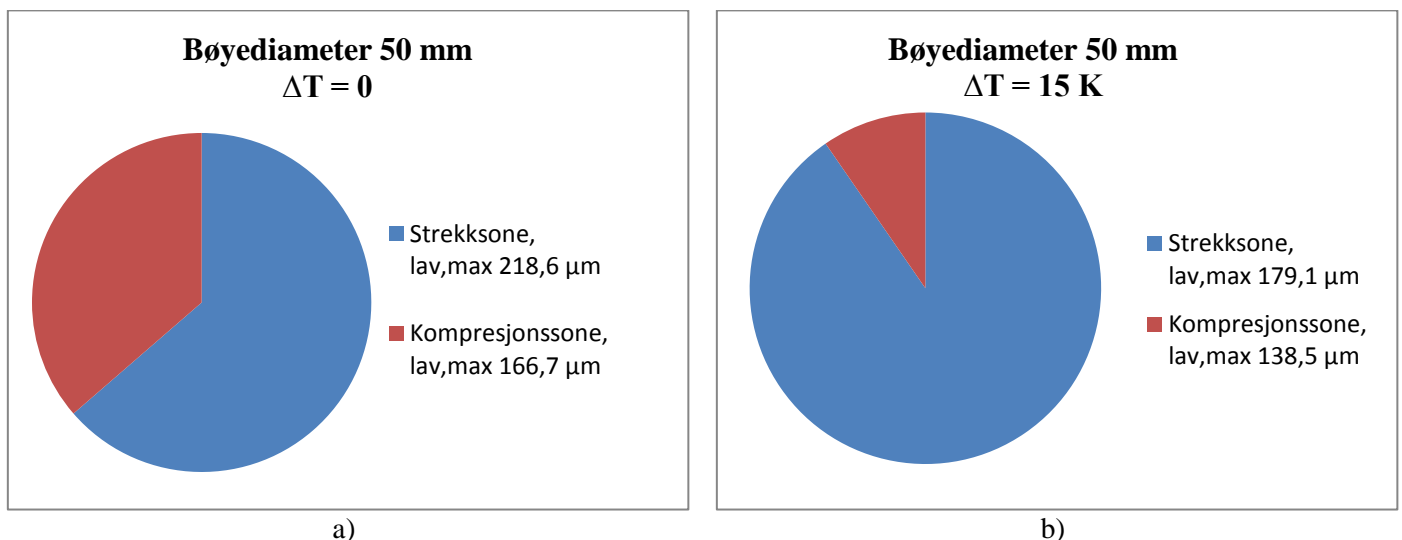
4.1 Resultater fra eksperimentet med statisk mekanisk belastede kabler

Resultatene i delkapittel 4.1 er fra eksperimentene med statisk mekanisk belastede kabler, henholdsvis høsten 2010 med vanntemperatur lik 30 °C og våren 2011 med vanntemperatur lik 60 °C. Alle kablene ble aldret med $U=2U_0$. Alle verdiene brukt til de grafiske fremstillingene er hentet fra tabellene i Appendiks 5 og Appendiks 6.

4.1.1 Sammenligning av vanntrevekst i kabler belastet med strekk- og kompresjonskrefter

Forekomst av vanntrær per cm isolasjon

Figur 4.1 viser prosentvis fordeling av forekomst av ventilerte vanntrær ved indre halvleder i strekk- og kompresjonssone. Begge kablene har bøylediameter lik 50 mm. Kabelen i Figur 4.1 a) er aldret uten temperaturgradient og kabelen i Figur 4.1 b) er aldret med en temperaturgradient på 15 K. I analysen ble 35 mm isolasjon undersøkt av kabelen presentert i Figur 4.1 a) og 84 mm isolasjon ble undersøkt av kabelen presentert i Figur 4.1 b). Aldringstiden var 3 uker og vanntemperaturen var 30 °C.

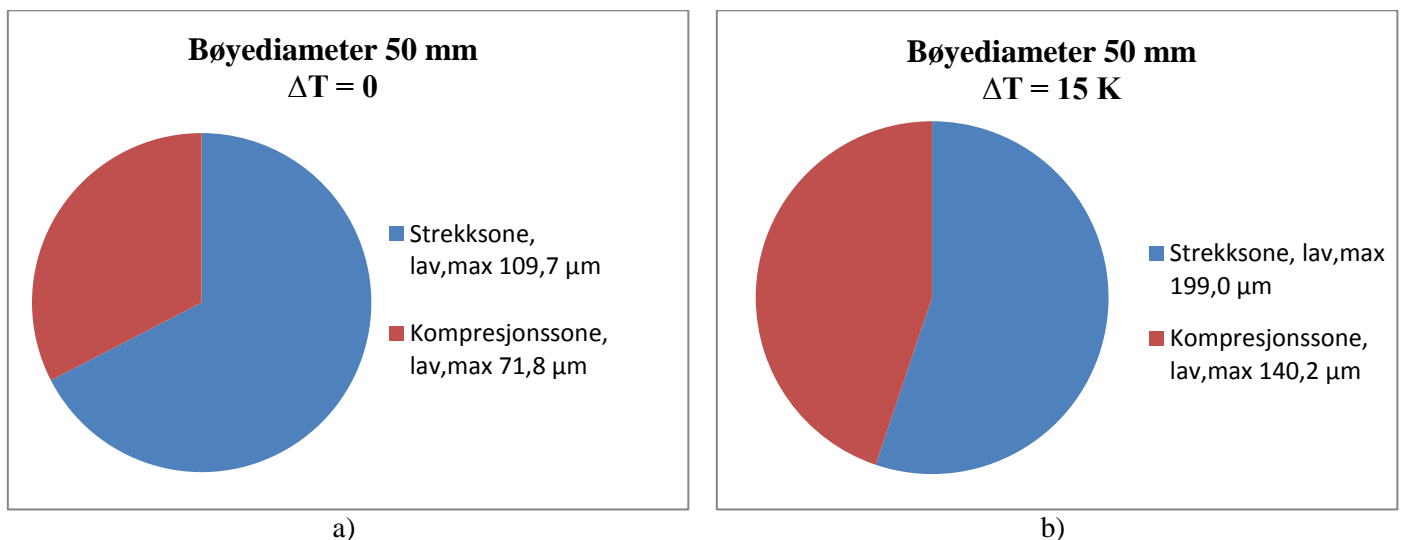


Figur 4.1: Prosentvis forekomst av ventilerte trær ved indre halvleder i strekk- og kompresjonssone i kabel med bøylediameter 50 mm. Kablene er aldret i 3 uker med $T=30$ °C.

Figur 4.1 viser at forekomsten av ventilerte trær ved indre halvleder er størst i strekksonen i bøyde kabler. I Figur 4.1 a) er 64 % av de ventilerte trærne i strekksonen og i Figur 4.1 b) er fordelingen 90 % i strekksonen mot 10 % i kompresjonssonen. Verdien av $I_{av,max}$,

gjennomsnittlig maksimal lengde, er tatt med for å angi forskjellen i vannrelengde i strekk- og kompresjonssonen. Verdiene angir at $l_{av,max}$ er størst i strekksonene. Den største verdien av $l_{av,max}$ er i strekksonen i kabelen aldret uten temperaturgradient, med $l_{av,max}=218,6 \mu\text{m}$. Den minste verdien av $l_{av,max}$ er i kompresjonssonen i kabelen aldret med $\Delta T=15 \text{ K}$, med $l_{av,max}=138,5 \mu\text{m}$.

Figur 4.2 viser prosentvis fordeling av bowtie-trær i strekk- og kompresjonssone. Begge kablene har bøylediameter lik 50 mm. Kabelen i Figur 4.2 a) er aldret uten temperaturgradient og kabelen i Figur 4.2 b) er aldret med en temperaturgradient på 15 K. I analysen ble 10,5 mm isolasjon undersøkt av kabelen presentert i Figur 4.2 a) og 10,5 mm isolasjon ble undersøkt av kabelen presentert i Figur 4.2 b). Aldringstiden var 3 uker og vann-temperaturen var 30 °C.



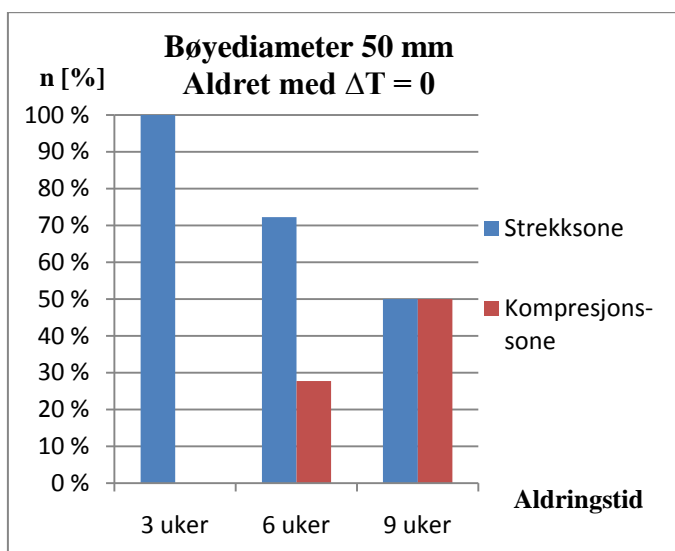
Figur 4.2: Prosentvis forekomst av ventilerte bowtie-trær i strekk- og kompresjonssone i kabel med bøylediameter 50 mm. Kablene er aldret i 3 uker med $T=30 \text{ °C}$.

I kabelen aldret med $\Delta T=0$, i Figur 4.2 a), er 67 % av bowtie-trærne i strekksonen. I kabelen aldret med $\Delta T=15 \text{ K}$, i Figur 4.2 b), er 55 % av bowtie-trærne i strekksonen. Det er altså størst forekomst av bowtie-trær i strekksonen i begge de bøyde kablene. Den største verdien av gjennomsnittlig maksimal lengde, $l_{av,max}$, er i strekksonen i kabelen aldret med $\Delta T=15 \text{ K}$, med $l_{av,max}=199,0 \mu\text{m}$, mens den minste verdien av $l_{av,max}$ er i kompresjonssonen i kabelen aldret uten temperaturgradient, med $l_{av,max}=71,8 \mu\text{m}$.

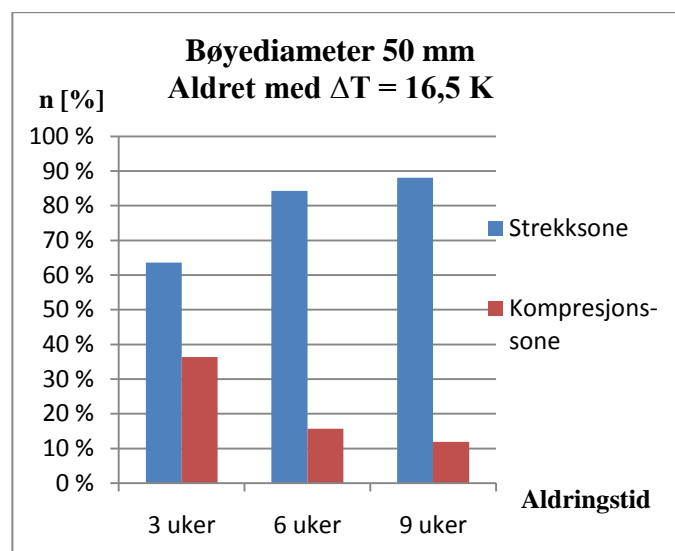
Figur 4.3 viser prosentvis fordeling av forekomst av ventilerte vanntrær ved indre halvleder i strekk- og kompresjonssone. Aldringstiden er 3, 6 og 9 uker. Tabell 4.1 angir analysert isolasjonslengde for ventilerte trær i hver kabel i eksperimentet med $T=60 \text{ °C}$.

Tabell 4.1: Analysert isolasjonslengde for ventilerte trær i forsøket med $T=60\text{ }^{\circ}\text{C}$.

| Ventilerte trær | | Aldringstid [uker] | Analysert isolasjonslengde [mm] |
|------------------------------------|-------------------------|--------------------|---------------------------------|
| Temperaturgradient, ΔT [K] | Bøylediameter, d [mm] | | |
| 0 | 50 | 3 | 42,8 |
| | | 6 | 40,0 |
| | | 9 | 40,0 |
| 0 | ∞ | 3 | 41,6 |
| | | 6 | 40,0 |
| | | 9 | 40,0 |
| 16,5 | 50 | 3 | 72,4 |
| | | 6 | 110,0 |
| | | 9 | 148,0 |
| 16,5 | ∞ | 3 | 84,0 |
| | | 6 | 86,8 |
| | | 9 | 70,0 |



a)



b)

Figur 4.3: Prosentvis forekomst av ventilerte trær ved indre halvleder i strekk- og kompresjonsone. Kablene er aldret i 3, 6 og 9 uker med $T=60\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Figur 4.3 a) angir prosentvis fordelingen av forekomst av ventilerte trær ved indre halvleder i bøyd kabel aldret uten temperaturgradient. Det ble ikke gjort noen funn av ventilerte trær i kompresjonssonen etter 3 ukers aldring. I de bøyde kablene er forekomsten av ventilerte trær størst i strekksonen. Unntaket er kabelen aldret i 9 uker i Figur 4.3 a) hvor fordelingen mellom sonene er like. Andelen av ventilerte trær i strekksonene i kabler aldret 3 og 6 uker er henholdsvis 100 % og 64 %.

Fordelingen av ventilerte trær ved indre halvleder i bøyd kabel aldret med temperaturgradient angis i Figur 4.3 b). Grafen viser at forekomsten av trær er størst i strekksonen i alle prøveuttakene. Andelen av ventilerte trær ved indre halvleder i strekksonen er 64-88 %.

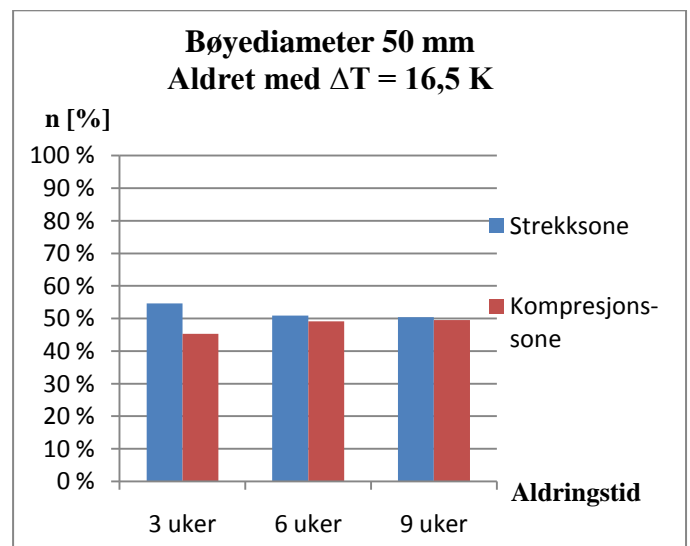
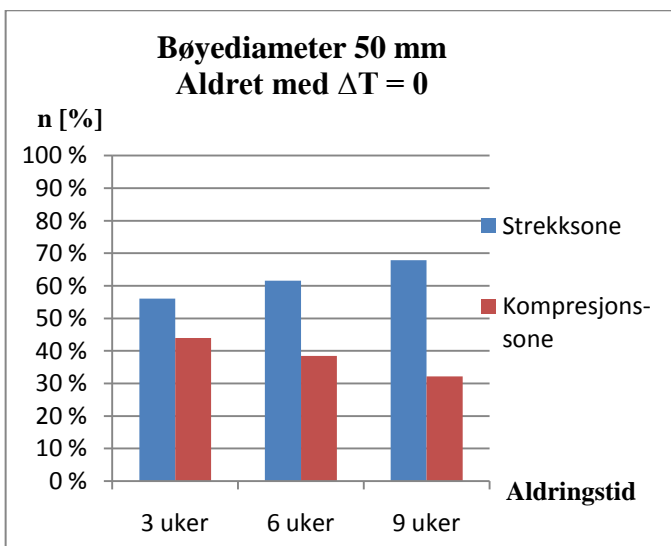
Prosentvis fordeling av forekomst av ventilerte trær i de rette kablene er presentert i Figur A.6 vedlagt i Appendiks 8.

Få ventilerte trær ved ytre halvleder ble observert under analysen av kablene. Tabell A.12 og Tabell A.13 i Appendiks 6 viser forekomst per cm isolasjon og $\overline{l_{\max}}$ for ventilerte trær ved ytre halvleder.

Figur 4.4 viser prosentvis fordeling av forekomst av bowtie-trær i strekk- og kompresjons-sone. Aldringstiden er 3, 6 og 9 uker. Tabell 4.2 angir analysert isolasjonslengde for bowtie-trær i hver kabel i eksperimentet med $T=60\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Tabell 4.2: Analysert isolasjonslengde for bowtie-trær i forsøket med $T=60\text{ }^{\circ}\text{C}$.

| Bowtie-trær | | Aldringstid [uker] | Analysert isolasjonslengde [mm] |
|---------------------------------------|--------------------------|-----------------------|---------------------------------------|
| Temperaturgradient, ΔT [K] | Bøylediameter, d [mm] | | |
| 0 | 50 | 3 | 4 |
| | | 6 | 2 |
| | | 9 | 4 |
| 0 | ∞ | 3 | 2 |
| | | 6 | 2 |
| | | 9 | 2 |
| 16,5 | 50 | 3 | 4 |
| | | 6 | 4 |
| | | 9 | 4 |
| 16,5 | ∞ | 3 | 4 |
| | | 6 | 4 |
| | | 9 | 4 |



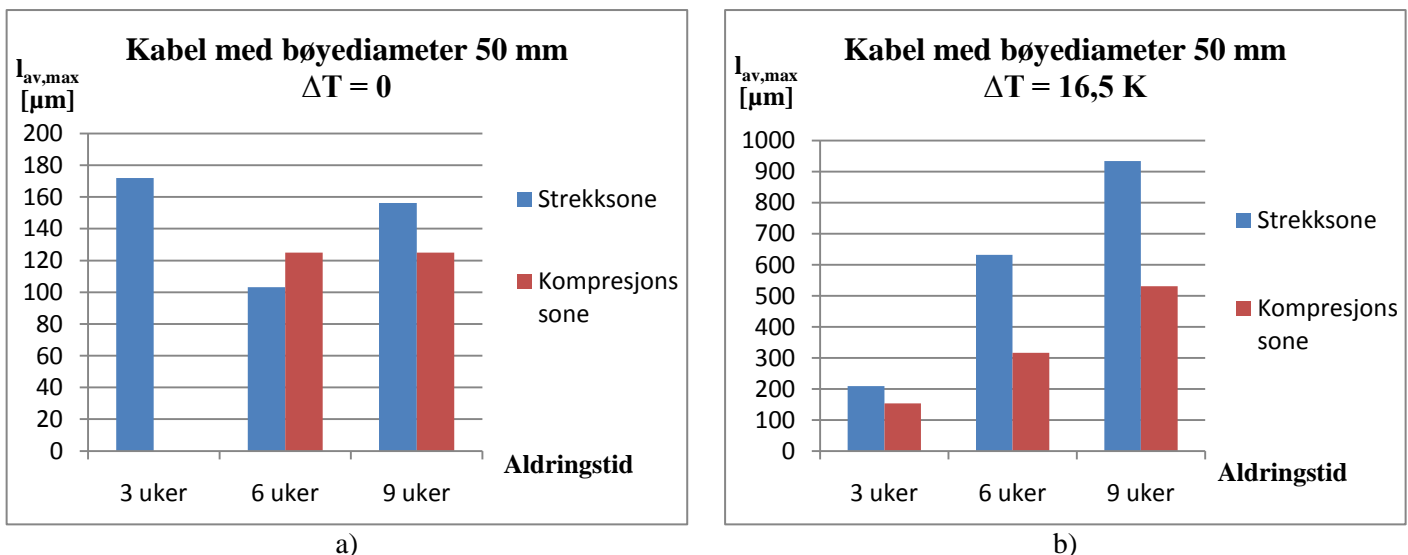
Figur 4.4: Prosentvis forekomst av bowtie-trær i strekk- og kompresjons-sone.

Figur 4.4 a) angir fordelingen i strekk- og kompresjonssonen av bowtie-trær i bøyde kabler aldret uten temperaturgradient. Fra grafen fremgår det at den største andelen av trær finnes i strekksonen, fra 56-68 %.

Figur 4.4 b) angir fordelingen i strekk- og kompresjonssonen av bowtie-trær i bøyde kabler aldret med temperaturgradient. Prøveuttaket etter 3 ukers aldring har større forekomst av trær i strekksonen enn i kompresjonssonen, 55 % mot 45 %. Etter 6 og 9 ukers aldring er forekomsten omtrent jevnt fordelt mellom sonene.

Gjennomsnittlig maksimal lengde

Figur 4.5 viser gjennomsnittlig maksimal lengde, $\overline{l_{\max}}$, av ventilerte trær ved indre halvleder i strekk- og kompresjonssone i bøyde kabler aldret med eller uten temperaturgradient.



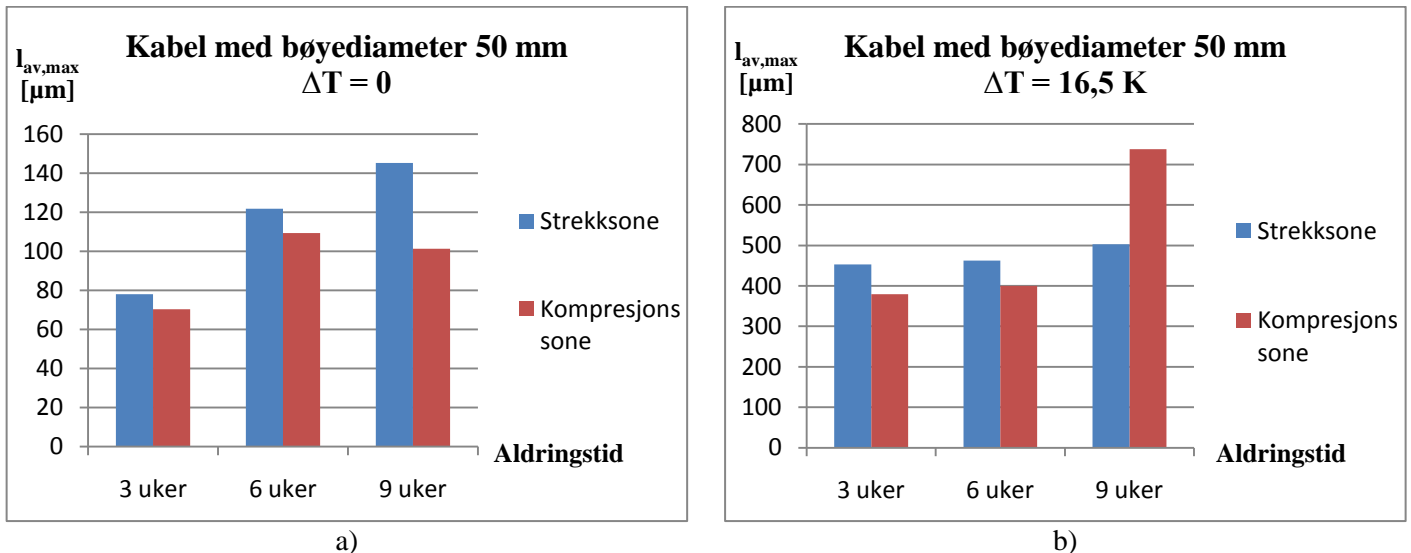
Figur 4.5: Gjennomsnittlig maksimal lengde av ventilerte trær ved indre halvleder i strekk- og kompresjonssone.

Figur 4.5 a) viser $\overline{l_{\max}}$ av ventilerte trær i bøyde kabler aldret uten temperaturgradient. Det ble ikke observert trær i kompresjonssonen etter 3 ukers aldringstid. Det forklarer hvorfor $\overline{l_{\max}}=0 \mu\text{m}$. Etter 6 ukers aldring er $\overline{l_{\max}}$ størst i kompresjonssonen, mens etter 9 uker er $\overline{l_{\max}}$ størst i strekksonen. Den minste forskjellen av $\overline{l_{\max}}$ i strekk- og kompresjonssonen er $21,9 \mu\text{m}$ etter 6 ukers aldringstid. Den største verdien av $\overline{l_{\max}}$ er i strekksonen i kabelen som er aldret 3 uker, der $\overline{l_{\max}}=171,9 \mu\text{m}$. Den minste verdien av $\overline{l_{\max}}$ er i strekksonen i kabelen som er aldret i 6 uker, der $\overline{l_{\max}}=103,1 \mu\text{m}$.

Figur 4.5 b) viser $\overline{l_{\max}}$ av ventilerte trær i bøyde kabler aldret med temperaturgradient. Figuren viser at $\overline{l_{\max}}$ er størst i strekksonen ved alle prøveuttakene. $\overline{l_{\max}}=153,6 \mu\text{m}$ er den minste verdien av $\overline{l_{\max}}$ og er i kompresjonssonen i kabelen som er aldret i 3 uker. Etter 3 uker er forskjellen i $\overline{l_{\max}}$ minst mellom strekk- og kompresjonssonen med $55,8 \mu\text{m}$. Den

største verdien av $\overline{l_{\max}}$ finnes i strekksone i kabelen som er aldret i 9 uker, der $\overline{l_{\max}}=934,2 \mu\text{m}$.

Figur 4.6 viser $\overline{l_{\max}}$ av bowtie-trær i strekk- og kompresjonssone i bøyde kabler aldret med eller uten temperaturgradient.



Figur 4.6: Gjennomsnittlig maksimal lengde bowtie-trær i strekk- og kompresjonssone.

Figur 4.6 a) viser at $\overline{l_{\max}}$ av bowtie-trær i kabler aldret uten temperaturgradient er størst i strekksone. Forskjellen i $\overline{l_{\max}}$ mellom strekk- og kompresjonssone er $7,8 \mu\text{m}$ etter 3 ukers aldring og $12,5 \mu\text{m}$ etter 6 ukers aldring. Etter 9 ukers aldring er forskjellen i $\overline{l_{\max}}$ mellom strekk- og kompresjonssone $43,9 \mu\text{m}$. Den største og minste verdien av $\overline{l_{\max}}$ er $145,3 \mu\text{m}$ og $70,3 \mu\text{m}$, fra henholdsvis strekksone etter 9 ukers aldring og i kompresjonssone etter 3 ukers aldring.

Figur 4.6 b) viser at $\overline{l_{\max}}$ av bowtie-trær i kabler aldret med temperaturgradient i 3 og 6 uker er størst i strekksone. Etter 9 ukers aldring er $\overline{l_{\max}}$ størst i kompresjonssone. Etter 6 uker er forskjellen i $\overline{l_{\max}}$ mellom sonene minst, med $62,5 \mu\text{m}$. I kompresjonssone i kabelen aldret i 9 uker finnes den største verdien av $\overline{l_{\max}}$, med $737,5 \mu\text{m}$, mens den minste verdien er $379,7 \mu\text{m}$ i kompresjonssone i kabelen aldret i 3 uker.

Det er dokumentert at forekomsten av ventilerte trær ved indre halvleder er størst i strekksone i kabler som er aldret med statisk mekanisk belastning.

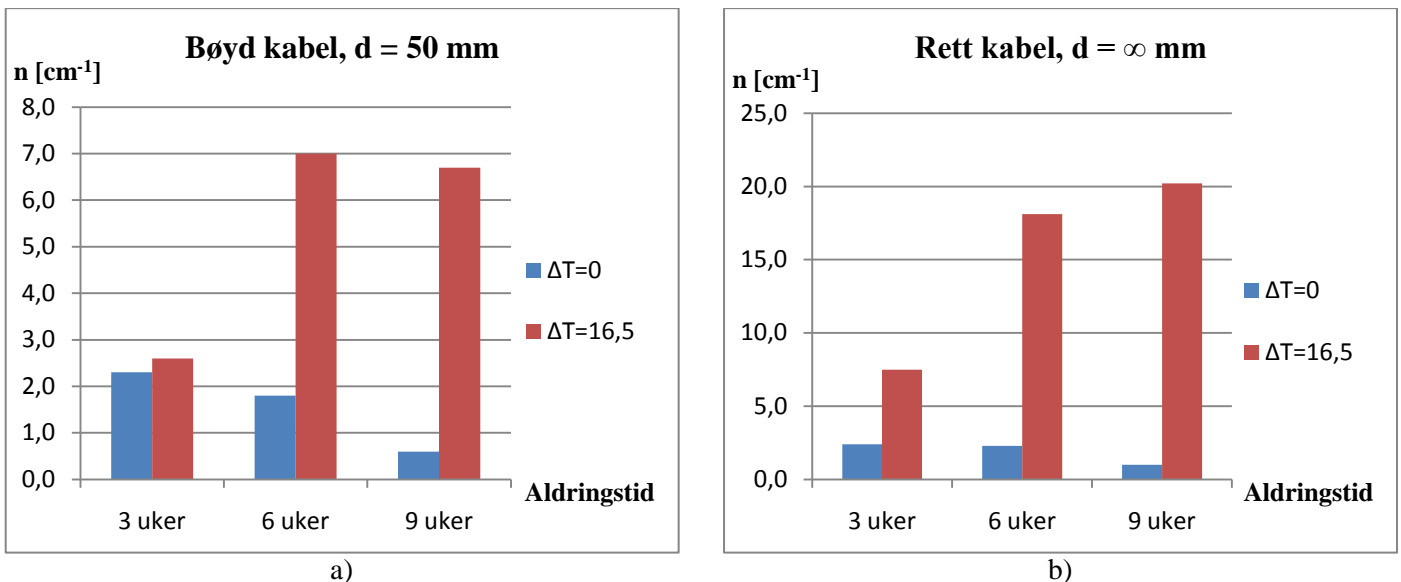
Forekomsten av bowtie-trær i strekksone i mekanisk statisk belastede kabler er større eller lik forekomsten av bowtie-trær i kompresjonssone i de samme kablene.

Gjennomsnittlig maksimal lengde, $\overline{l_{\max}}$, er dokumentert størst i strekksone i kabler aldret med statisk mekanisk belastning, med unntak av et par tilfeller, både for ventilerte trær ved indre halvleder og bowtie-trær.

4.1.2 Sammenligning av vanntrevekst i kabler aldret med og uten temperaturgradient

Forekomst av vanntrær per cm isolasjon

Figur 4.7 viser forskjellen i forekomst av ventilerte trær per cm isolasjon ved indre halvleder i kabler aldret med og uten temperaturgradient.



Figur 4.7: Forekomst av ventilerte trær ved indre halvleder per centimeter isolasjon.

Grafen i Figur 4.7 a) viser forekomst av ventilerte trær ved indre halvleder per cm isolasjon i bøyde kabler aldret med og uten temperaturgradient. Etter 3 ukers aldringstid er forekomsten omtrent lik i kablene med og uten temperaturgradient. I kablene som er aldret i 6 og 9 uker er forekomsten av ventilerte trær størst i kablene aldret med temperaturgradient, henholdsvis 3,9 og 11,2 ganger større enn i kablene aldret uten temperaturgradient. Størst forekomst av ventilerte trær er det etter 6 uker i kabelen aldret med $\Delta T=16,5$ K, med $n=7,0$ trær per cm isolasjon.

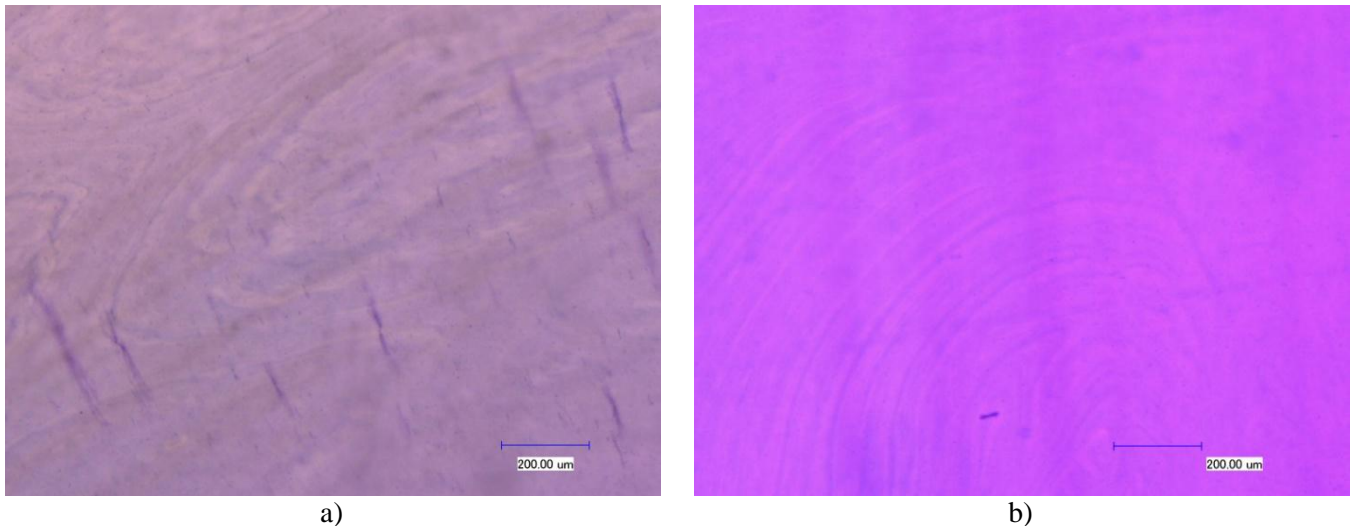
I de rette kablene i Figur 4.7 b) er forekomsten av ventilerte trær ved indre halvleder per cm isolasjon størst i kablene aldret med temperaturgradient. Størst forekomst av trær er det etter 9 ukers aldringstid, med $n=20,2$ trær per cm isolasjon. Forskjellen i forekomst av trær i kabelen som er aldret i 9 uker med $\Delta T=16,5$ K er 20 ganger høyere enn i kabelen aldret med $\Delta T=0$.

Ved å sammenligne skalaene på y-aksen i de to grafene i Figur 4.7 observeres det at forekomsten av trær er størst i de rette kablene aldret med temperaturgradient.

Forekomsten av bowtie-trær kan ikke sammenlignes på tilsvarende måte som for de ventilerte trærne. Det kommer av at mikroskopanalysen ble gjennomført på to forskjellige

måter, slik det ble beskrevet i delkapittel 3.5.3. Forskjellen i forekomst av bowtie-trær i kabler aldret med og uten temperaturgradient vises med bildene i Figur 4.8.

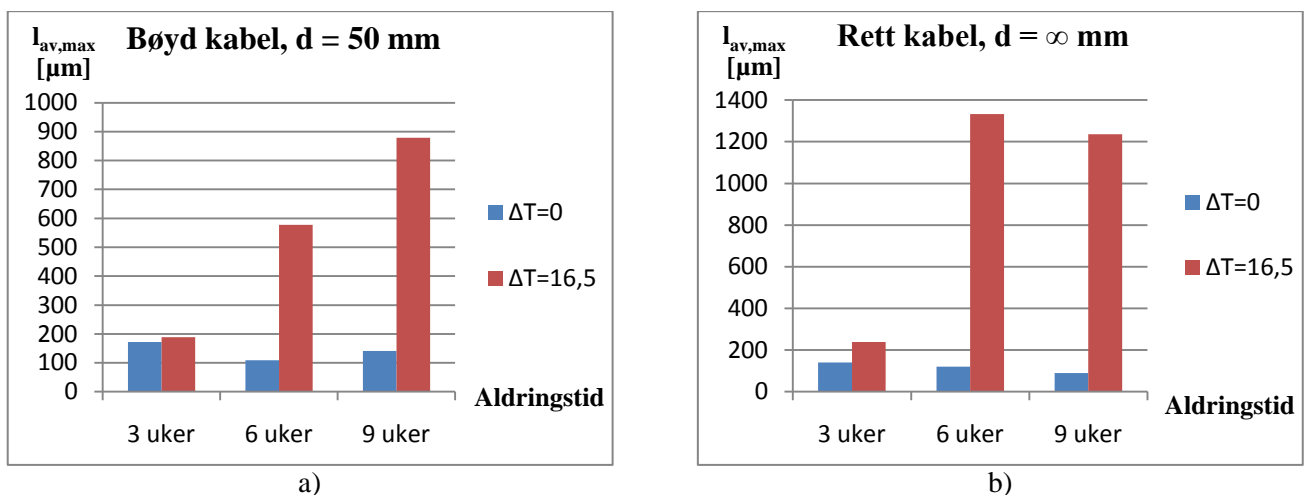
Begge bildene i Figur 4.8 er fra kabler som er aldret i 6 uker. Figur 4.8 a) viser stor forekomst av bowtie-trær i kabelen som er aldret med temperaturgradient. Figur 4.8 b) viser at forekomsten i kabelen som er aldret uten temperaturgradient er lav. I Appendix 18 er det lagt ved bilder fra alle kablene for å beskrive forskjellen i forekomst av bowtie-trær.



Figur 4.8: a) Bowtie-trær i kabel aldret med $\Delta T=16,5$ i 6 uker. b) Bowtie-trær i kabel aldret med $\Delta T=0$ i 6 uker. Skalaen viser 200,00 μm .

Gjennomsnittlig maksimal lengde

Figur 4.9 viser gjennomsnittlig maksimal lengde av ventilerte trær ved indre halvleder i kabler aldret med og uten temperaturgradient.



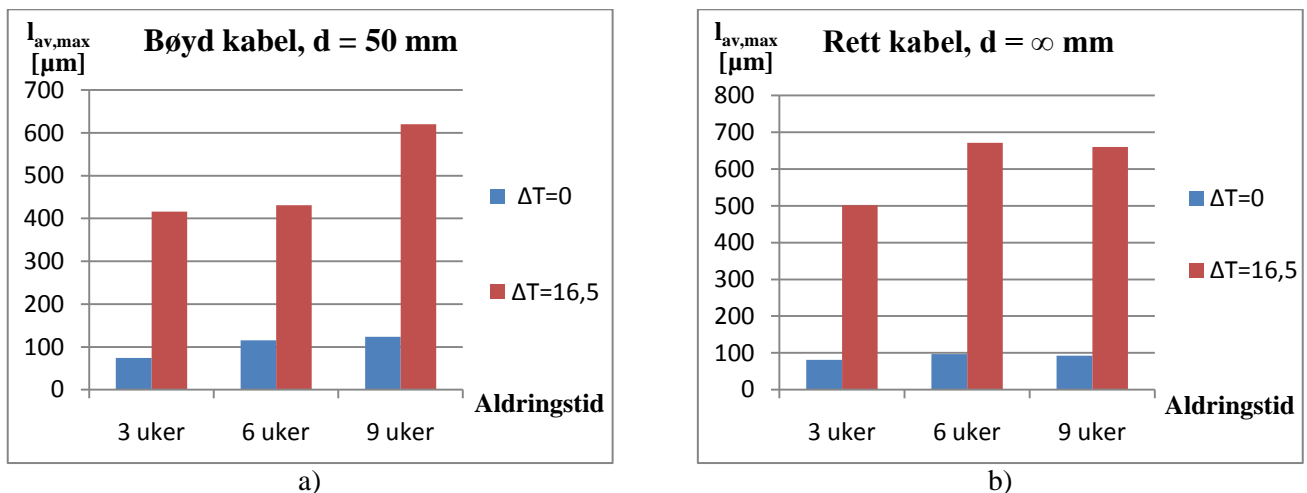
Figur 4.9: Gjennomsnittlig maksimal lengde av ventilerte trær ved indre halvleder i kabler aldret med og uten temperaturgradient.

Figur 4.9 a) viser gjennomsnittlig maksimal lengde av ventilerte trær ved indre halvleder i bøyde kabler aldret med og uten temperaturgradient. Etter aldring i 3 uker er $\overline{l_{\max}}$ ($l_{\text{av,max}}$) tilnærmet lik i begge kablene. Etter 6 og 9 ukers aldring er $\overline{l_{\max}}$ lavere i kablene aldret uten temperaturgradient enn i kablene aldret med temperaturgradient. $\overline{l_{\max}}$ i kabler aldret med $\Delta T=16,5$ K er over 6 ganger størrelsen til $\overline{l_{\max}}$ i kabler aldret med $\Delta T=0$ etter 9 ukers aldringstid. Den største og minste verdien av $\overline{l_{\max}}$ i de bøyde kablene er $879,3 \mu\text{m}$ i kabel aldret i 9 uker med $\Delta T=16,5$ K og $109,4 \mu\text{m}$ i kabelen aldret i 6 uker med $\Delta T=0$.

Figur 4.9 b) viser gjennomsnittlig maksimal lengde av ventilerte trær ved indre halvleder i rette kabler aldret med og uten temperaturgradient. Grafen angir at $\overline{l_{\max}}$ er høyere i kablene aldret med temperaturgradient lik $16,5$ K enn i kablene aldret med $\Delta T=0$. $\overline{l_{\max}}$ nesten 14 ganger større i kabelen aldret med temperaturgradient etter 9 ukers aldringstid. Den største og minste verdien av $\overline{l_{\max}}$ i de rette kablene er $1332,4 \mu\text{m}$ i kabel aldret i 6 uker med $\Delta T=16,5$ K og $89,8 \mu\text{m}$ i kabel aldret i 9 uker med $\Delta T=0$.

Ved å sammenligne y-aksen i de to grafene i Figur 4.9 observeres det at flere av verdiene av $\overline{l_{\max}}$ i kabler aldret med $\Delta T=16,5$ K er større i de rette kablene enn i de bøyde kablene.

Figur 4.10 viser gjennomsnittlig maksimal lengde av bowtie-trær i kabler aldret med og uten temperaturgradient.



Figur 4.10: Gjennomsnittlig maksimal lengde av bowtie-trær i kabler aldret med og uten temperaturgradient.

Figur 4.10 a) viser $\overline{l_{\max}}$ ($l_{\text{av,max}}$) av bowtie-trær i bøyde kabler aldret med og uten temperaturgradient. $\overline{l_{\max}}$ av bowtie-trærne i de bøyde kablene aldret med $\Delta T=16,5$ K er 3,7 til 5 ganger større enn $\overline{l_{\max}}$ av bowtie-trærne i kablene aldret med $\Delta T=0$. Største og minste verdi av $\overline{l_{\max}}$ er $620,3 \mu\text{m}$ i kabel aldret i 9 uker med $\Delta T=16,5$ K og $74,2 \mu\text{m}$ i kabel aldret i 3 uker med $\Delta T=0$.

Figur 4.10 b) viser $\overline{l_{\max}}$ av bowtie-trær i rette kabler aldret med og uten temperaturgradient. I de rette kablene er $\overline{l_{\max}}$ av trærne størst i kablene aldret med

$\Delta T=16,5$ K, fra 6 til 7,2 ganger større enn i kablene aldret med $\Delta T=0$. $\overline{l_{\max}}$ er størst i kablen aldret med temperaturgradient i 6 uker, med $\overline{l_{\max}}=671,1$ μm og $\overline{l_{\max}}$ er minst i kablen aldret i 3 uker med $\Delta T=0$, med $\overline{l_{\max}}=81,3$ μm .

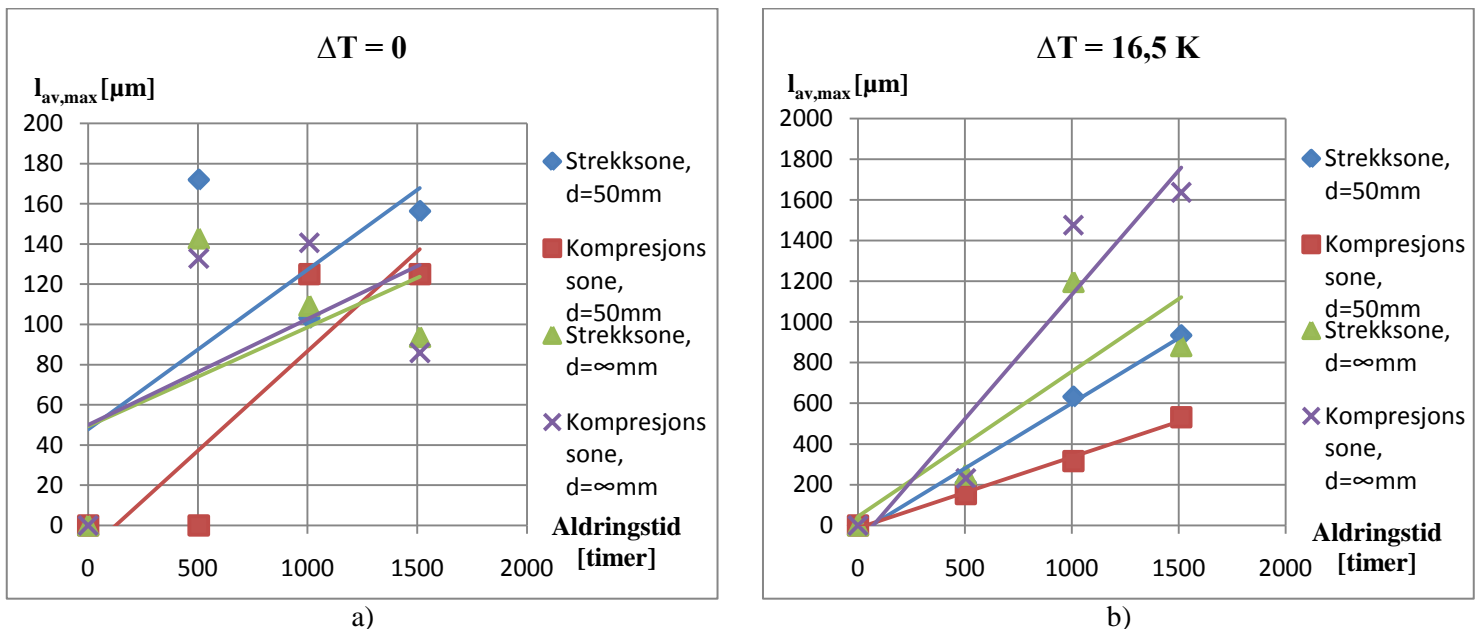
Det er dokumentert at kabler aldret med temperaturgradient har større forekomst av ventilerte trær ved indre halvleder per cm isolasjon sammenlignet med kabler aldret uten temperaturgradient. Kabler aldret med $\Delta T=16,5$ K har opptil 20 ganger høyere forekomst av ventilerte trær ved indre halvleder per cm isolasjon enn i kabler aldret med $\Delta T=0$.

Forskjellen i forekomst av bowtie-trær er dokumentert med bilder som viser at forekomsten er størst i kablene aldret med temperaturgradient.

Gjennomsnittlig maksimal lengde, $\overline{l_{\max}}$, av både ventilerte trær ved indre halvleder og bowtie-trær er større i kabler aldret med $\Delta T=16,5$ K enn i kabler aldret med $\Delta T=0$. $\overline{l_{\max}}$ er opptil 14 ganger større for ventilerte trær og over 7 ganger større for bowtie-trær i kabler aldret med $\Delta T=16,5$ K enn i kabler aldret med $\Delta T=0$.

4.1.3 Utvikling av gjennomsnittlig maksimal lengde over tid

I Figur 4.11 og Figur 4.12 er gjennomsnittlig maksimal lengde av henholdsvis ventilerte trær ved indre halvleder og bowtie-trær, plottet som funksjon av aldringstiden i timer. Figurene viser dermed utviklingen av $\overline{l_{\max}}$ over tid. I begge figurene er strekk- og kompresjonssonen plottet for både rett og bøyd kabel. Trendlinjer er lagt til i figurene for lettere å se utviklingen av $\overline{l_{\max}}$.



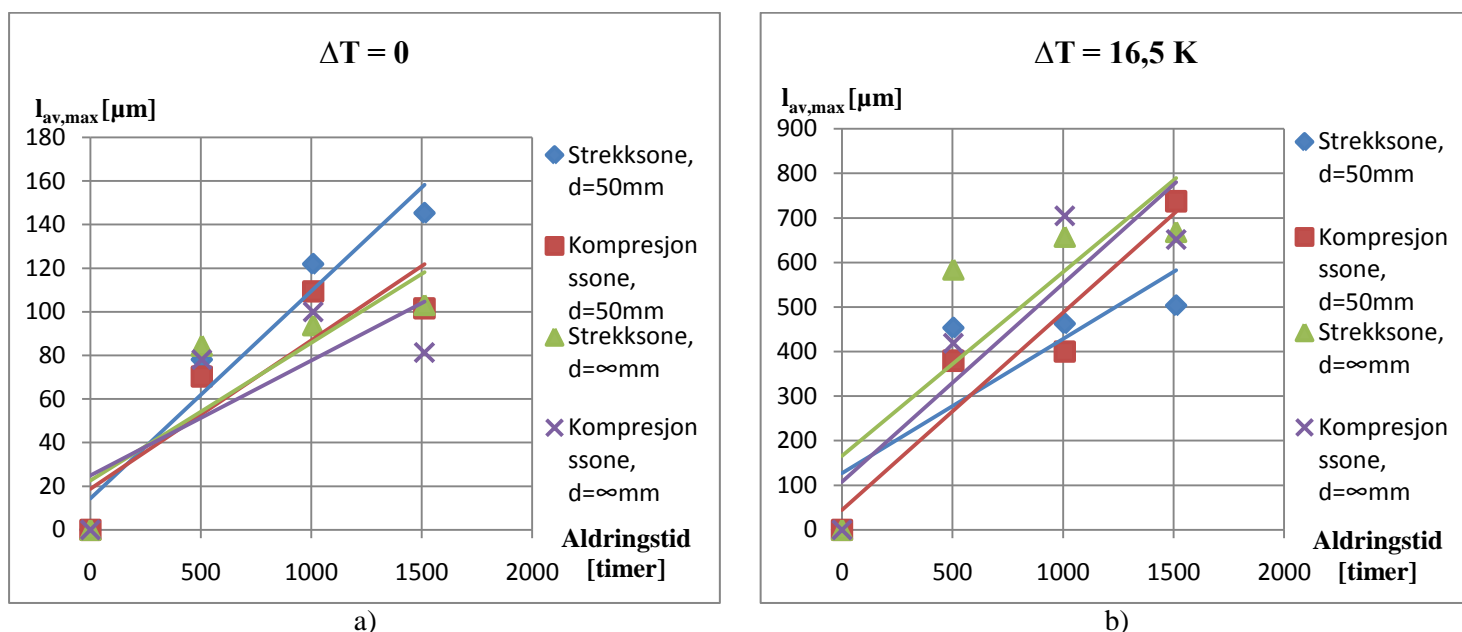
Figur 4.11: Gjennomsnittlig maksimal lengde av ventilerte trær ved indre halvleder plottet med hensyn til aldringstid.

Figur 4.11 a) viser $\overline{l_{\max}}$ av ventilerte trær ved indre halvleder i kabler aldret uten temperaturgradient. Alle linjene har en positiv trend, det vil si at $\overline{l_{\max}}$ øker med aldringstiden. Verdiene av $\overline{l_{\max}}$ ligger mellom 0 og 180 μm .

Ved å studere posisjonen til trendlinjene i Figur 4.11 a) forhold til hverandre kommer det fram om $\overline{l_{\max}}$ er størst i strekksone eller kompresjonsone. Den blå trendlinja ligger over de andre linjene, også den røde, altså er $\overline{l_{\max}}$ av ventilerte trær i strekksone i den bøyde kabelen større enn i kompresjonsone. Trendlinja for kompresjonsone i de bøyde kablene er lavere plassert i grafen enn trendlinjene til de rette kablene. Det betyr at $\overline{l_{\max}}$ er lavere i kompresjonsone i de bøyde kablene enn sett i forhold til de ubelastede kablene. Trendlinjene til de rette kablene viser at utviklingen av $\overline{l_{\max}}$ er tilnærmet lik i begge sonene.

Figur 4.11 b) viser $\overline{l_{\max}}$ av ventilerte trær ved indre halvleder i kabler aldret med temperaturgradient. Trendlinjene viser at $\overline{l_{\max}}$ øker med økt aldringstid. Verdiene av $\overline{l_{\max}}$ ligger mellom 0 og 1800 μm . $\overline{l_{\max}}$ er høyere i disse kablene enn i kablene aldret uten temperaturgradient.

Trendlinjene i grafen i Figur 4.11 b) angir at $\overline{l_{\max}}$ er større i strekksone enn i kompresjonsone i den bøyde kabelen fordi trendlinja til strekksone er plassert høyere enn trendlinja til kompresjonsone. Trendlinjene til de rette kablene ligger høyere enn til de bøyde kablene, det vil si at $\overline{l_{\max}}$ er lavere i de bøyde kablene.



Figur 4.12: Gjennomsnittlig maksimal lengde av bowtie-trær plottet med hensyn til aldringstid.

Figur 4.12 a) viser $\overline{l_{\max}}$ av bowtie-trær i kabler aldret uten temperaturgradient. Trendlinjene angir at $\overline{l_{\max}}$ øker med økt aldringstid. Verdiene av $\overline{l_{\max}}$ ligger mellom 0 og 160 μm .

Den blå trendlinja i Figur 4.12 a), som representerer strekksonen i de bøyde kablene, ligger over de andre trendlinjene. Det betyr at $\overline{l_{\max}}$ er større i strekksonen i de bøyde kablene enn i de andre sonene i de andre kablene. De tre andre linjene viser omtrent lik utvikling av $\overline{l_{\max}}$.

Figur 4.12 b) viser $\overline{l_{\max}}$ av bowtie-trær i kabler aldret med temperaturgradient. Grafen viser at $\overline{l_{\max}}$ øker med økt aldringstid. Verdiene av $\overline{l_{\max}}$ ligger mellom 0 og 800 μm . $\overline{l_{\max}}$ er høyere i disse kablene enn i kablene aldret uten temperaturgradient.

$\overline{l_{\max}}$, presentert med trendlinjer i Figur 4.12 b), til de rette kablene og til kompresjonssonene til de bøyde kablene viser tilnærmet lik utvikling over tid. Trendlinja for strekksonene i de bøyde kablene er plassert lavere enn de andre trendlinjene. Det betyr at $\overline{l_{\max}}$ er større i kompresjonssonene enn i strekksonene i de bøyde kablene. $\overline{l_{\max}}$ er lavere i kompresjonssonene i de bøyde kablene sammenlignet med sonene i de rette kablene.

Det er dokumentert at gjennomsnittlig maksimal lengde, $\overline{l_{\max}}$, av ventilerte trær ved indre halvleder og bowtie-trær øker med økt aldringstid.

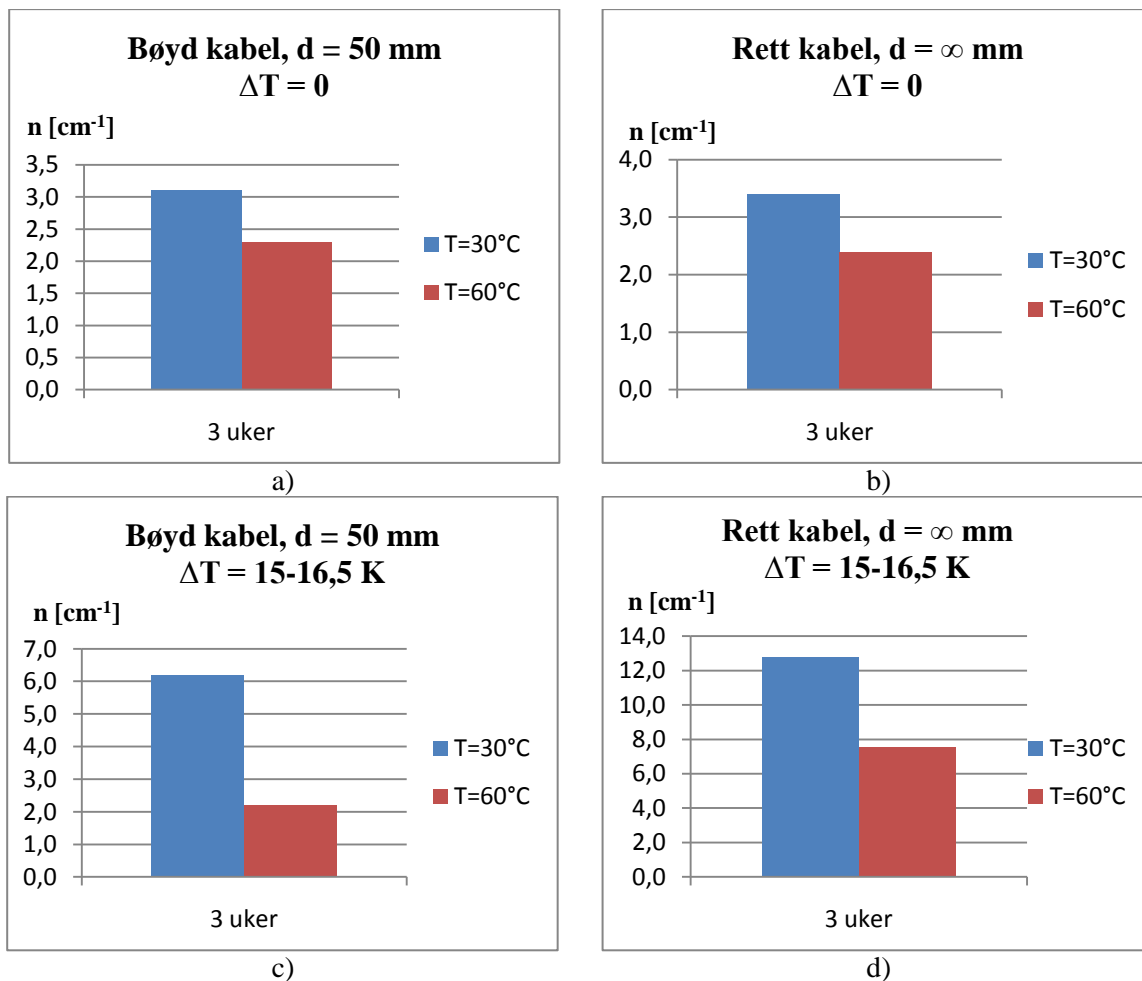
Det er videre dokumentert at i de fleste tilfeller er $\overline{l_{\max}}$ mindre i kompresjonssonen enn i strekksonen i de bøyde kablene både for ventilerte trær og bowtie-trær. $\overline{l_{\max}}$ er i de fleste tilfeller også mindre i kompresjonssonen i de bøyde kablene enn i strekk- og kompresjonssone i de rette kablene. Det antyder at kompresjonskreftene reduserer $\overline{l_{\max}}$.

Verdien av $\overline{l_{\max}}$ er større i kabler aldret med temperaturgradient enn i kabler aldret uten temperaturgradient.

4.1.4 Sammenligning av vanntrevekst ved ulike temperaturforhold

Forekomst av vantrær per cm isolasjon

Figur 4.13 viser forekomst av ventilerte trær ved indre halvleder per cm isolasjon i kabler aldret med vanntemperatur lik 30 °C og 60 °C.



Figur 4.13: Forekomst av ventilerte trær ved indre halvleder i kabler aldret med vanntemperatur lik 30 °C og 60 °C.

Figur 4.13 a) og Figur 4.13 b) viser forekomst av ventilerte trær ved indre halvleder aldret i henholdsvis bøyd og rett kabel aldret uten temperaturgradient ved 30 °C og 60 °C. Figurene viser at forekomsten av trær er størst i kablene aldret med T=30 °C. Differansen er omtrent ett tre per cm.

Figur 4.13 c) og Figur 4.13 d) viser forekomst av ventilerte trær ved indre halvleder aldret i henholdsvis bøyd og rett kabel aldret med temperaturgradient ved 30 °C og 60 °C. Figurene viser at forekomsten av trær er størst i kablene aldret med T=30 °C. Forskjellen i forekomst av trær er omtrent 4-5 trær per cm isolasjon mer i kablene aldret med T=30 °C. Sammenlignet med Figur 4.13 a) og Figur 4.13 b) er differansen i forekomsten av trær ved forskjellig temperatur signifikant større i kablene aldret med temperaturgradient.

Mikroskopanalysen av bowtie-trær ble gjennomført uten dimethyl phthalate i eksperimentet med T=30 °C og med dimethyl phthalate i eksperimentet med T=60 °C. Analysemetodene anses som forskjellige fordi detekteringsgrensen kan bli lavere ved bruk av dimethyl phthalate, og verdiene fra analysene kan derfor ikke sammenlignes med hverandre.

Gjennomsnittlig maksimal lengde

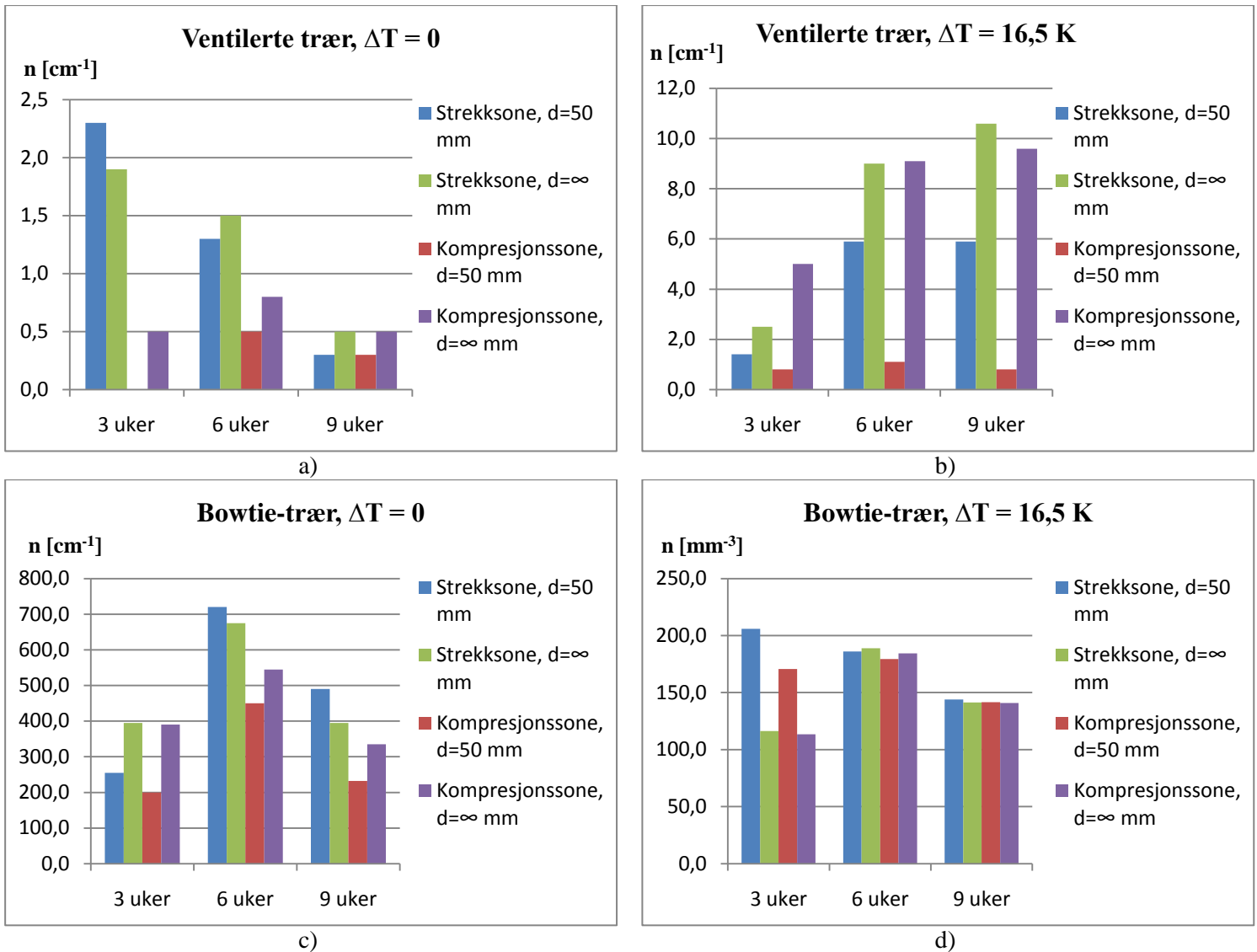
Den grafiske fremstillingen av gjennomsnittlig maksimal lengde av ventilerte trær ved indre halvleder og bowtie-trær i kabler aldret med $T=30\text{ °C}$ og $T=60\text{ °C}$ viser ingen klar trend med tanke på forskjellen av $\overline{l_{\max}}$ i kabler aldret med forskjellig temperatur. Men det observeres at for kabler aldret med temperaturgradient er $\overline{l_{\max}}$ av bowtie-trærne i kablene aldret ved $T=60\text{ °C}$ er 2,4 og 3,7 ganger større enn trærne i kablene aldret ved $T=30\text{ °C}$. Grafene er presentert i Figur A.10 og Figur A.11 i Appendiks 10.

4.1.5 Vanntrevekst i statisk mekanisk belastede kabler sammenlignet med ubelastede kabler

Forekomst av vanntrær

De ubelastede, rette kablene er med i analysen som referansepunkter. Når vanntrevekst i belastede kabler sammenlignes med vanntrevekst i ubelastede kabler kan det avgjøres om belastningen påvirker vanntreveksten. Figur 4.14 sammenligner forekomst av vanntrær i de respektive strekk- og kompresjonssonene i bøyde og rette kabler. I stolpediagrammene i figuren blir fire stolper presentert ved hvert prøveuttak. Blå og grønn stolpe representerer strekksonen i henholdsvis bøyd og rett kabel. Rød og fiolett stolpe representerer kompresjonssonen i henholdsvis bøyd og rett kabel.

Figur 4.14 a) og Figur 4.14 b) viser at forekomsten av ventilerte trær er lavere i strekksonen i de bøyde kablene enn i de rette, med unntak av uttaket etter 3 uker i kabelen aldret med $\Delta T=0$. Resultatene presentert i figurene viser at forekomsten av ventilerte trær i isolasjonen belastet av kompresjonskrefter reduseres, sett i forhold til referanseverdiene. I kabler aldret med $\Delta T=16,5\text{ K}$ er reduksjonen av forekomst av ventilerte trær som følge av kompresjonskrefter mellom 86 og 92 %. Reduksjonen fra kompresjonskreftene i kabler aldret med $\Delta T=0$ er 62-100 %.



Figur 4.14: Forekomst av vanntreer i bøyde og rette kabler.

Figur 4.14 c) viser forekomsten av bowtie-trær i kabler aldret med $\Delta T=0$. Med unntak av første prøveuttak etter 3 uker i kabler aldret med $\Delta T=0$, er forekomsten av bowtie-trær per cm isolasjon større i strekksonen i de bøyde kablene enn i de rette kablene. Som for de ventilerte trærne er virkningen av kompresjonskreftene karakteristisk i forhold til forekomst av trær. I forhold til de rette kablene er forekomsten av trær i kompresjonssonen i de bøyde kablene redusert med mellom 55-66 %.

Forekomsten av bowtie-trær per mm^3 i kabler aldret med $\Delta T=16,5$ K, i Figur 4.14 d), er omtrent lik for rett og bøyde kabel etter 6 uker. Det samme gjelder etter 9 ukers aldringstid. Effekten av strekk- og kompresjonskrefter er dermed insignifikant i disse kablene. Kablene aldret i 3 uker har størst forekomst av bowtie-trær i strekksonen i den bøyde kabelen. Forekomsten av trær i kompresjonssonen er større i den bøyde kabelen enn i den rette.

Gjennomsnittlig maksimal lengde

Resultatene i Figur 4.11 og Figur 4.12, forklart i delkapittel 4.1.3, viser at påkjenning av strekkrefter ikke øker forekomsten av ventilerte trær ved indre halvleder. Derimot er det dokumentert at innføringen av kompresjonskrefter fører til reduksjon i forekomst av ventilerte trær.

Forekomsten av bowtie-trær i strekksonen er større i enkelte av de bøyde kablene sammenlignet med de rette kablene. Kompresjonskreftene som belastet kablene aldret med $\Delta T=0$ har redusert forekomsten av bowtie-trær per cm isolasjon sett i forhold til rette kabler. Forekomsten av bowtie-trær per mm^3 er nesten lik i bøyde og rette kabler med unntak av prøveuttaket etter 3 ukers aldringstid.

4.1.6 Ventilerte trær ved ytre halvleder

Tabell A.5 og Tabell A.6 i Appendiks 5 angir forekomst og gjennomsnittlig maksimal lengde av ventilerte vanntrær ved ytre halvleder i kabler aldret med $T=30$ °C henholdsvis uten og med temperaturgradient. Ingen observasjoner av ventilerte trær ved ytre halvleder ble gjort i kablene aldret uten temperaturgradient. I kabler aldret med temperaturgradient ble det observert noen få trær. Av alle ventilerte trær som ble funnet i kabler aldret med temperaturgradient utgjør de ventilerte trærne ved ytre halvleder 6 %.

Tabell A.12 og Tabell A.13 i Appendiks 6 angir forekomst og gjennomsnittlig maksimal lengde av ventilerte vanntrær ved ytre halvleder i kabler aldret med $T=60$ °C henholdsvis uten og med temperaturgradient. Forekomsten er lav sammenlignet med ventilerte trær ved indre halvleder. Av alle ventilerte trær som ble funnet i kabler aldret uten temperaturgradient utgjør de ventilerte trærne ved ytre halvleder 5,5 %. I kabler aldret med temperaturgradient utgjør de ventilerte trærne ved ytre halvleder 1 %.

4.1.7 Estimerte verdier av maksimal vannrelengde

Ekstremalverdistatistikk, beskrevet i Appendiks 4, er brukt til estimering av maksimal vannrelengde, l_{max} . Sannsynligheten kan beregnes for at den maksimale vannrelengden i en gitt kabellengde overstiger l_{max} .

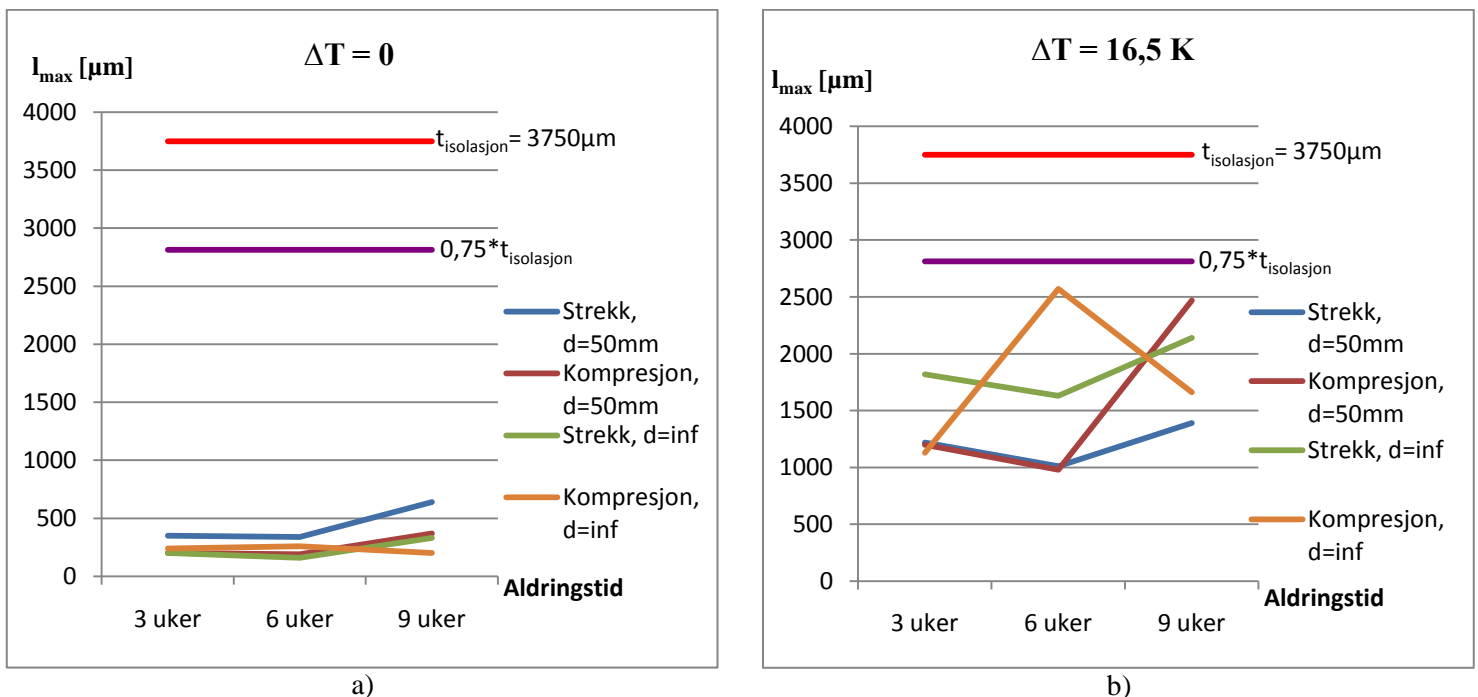
Tabell A.17, Tabell A.18 og Tabell A.19 i Appendiks 15 viser estimerte verdier fra forsøket med statisk mekanisk belastning med $T=30$ °C. Den kumulative sannsynlighetsfordelingen ble plottet på ekstremalverdipapir. Plottene er vedlagt i Appendiks 12.

Tabell A.20, Tabell A.21 og Tabell A.22, i Appendiks 15, viser parametrene beregnet til ligning (3.2) og korresponderende 5 %, 50 % og 95 % sannsynlighet for at den maksimale vannrelengden til vanntrærne i en 1 meter lang kabel overstiger den gitte verdien av l_{max} for kabler aldret med $T=60$ °C. Verdiene i grafene i Figur 4.15 og Figur 4.16 er basert på verdiene fra tabellene i vedlegget. Den kumulative sannsynlighetsfordelingen ble plottet

på ekstremalverdipapir. Plottene er vedlagt i Appendiks 13. Mer informasjon om ekstremalverdistatistikk og hvordan det benyttes i praksis er vedlagt i Appendiks 4.

I figurene er det lagt inn en rød linje som viser tykkelsen til isolasjonsveggen, $t_{\text{isolasjon}}=3750\ \mu\text{m}$, og en lilla linje som markerer punktet for 75 % av isolasjonstykkelsen. (Punktet for 75 % av isolasjonstykkelsen er tatt med for å vise nødvendigheten av å bruke $W(x)$, ligning (A4.2), i stedet for $F(x)$, ligning (A4.1) i Appendiks 4.)

Med 95 % sannsynlighet finnes det bowtie-trær med maksimal lengde større enn verdiene for l_{max} gitt i Figur 4.15.



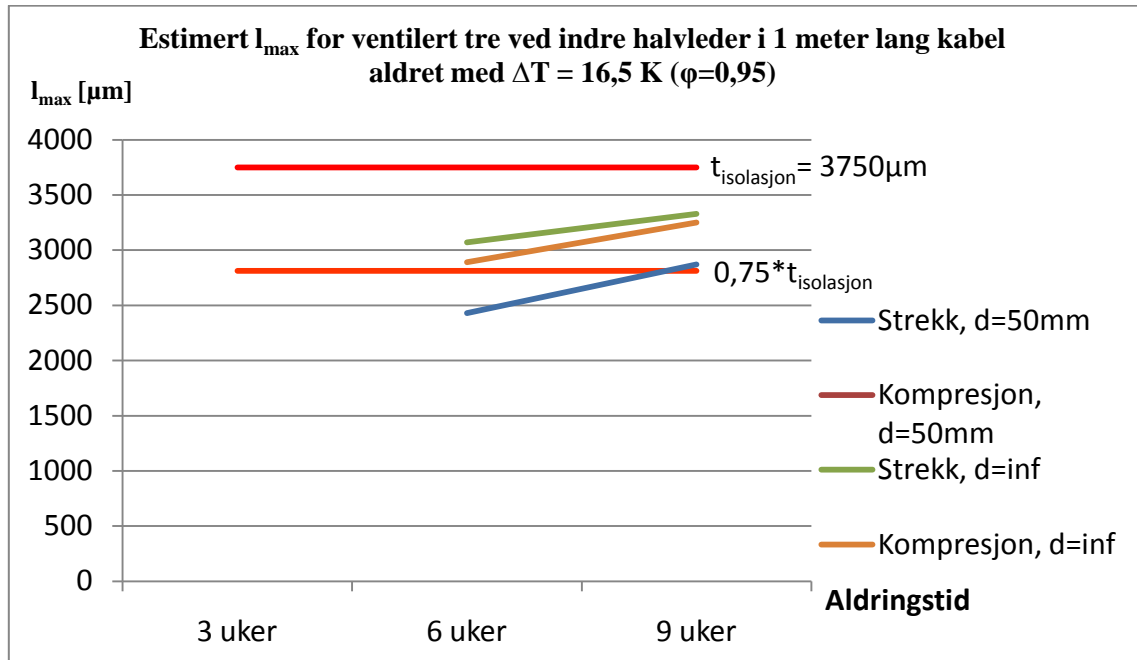
Figur 4.15: Estimerte verdier av l_{max} for bowtie-trær i 1 meter lang kabel ($\phi=0,95$).

Figur 4.15 a) viser at de estimerte verdiene av l_{max} for bowtie-trær aldret uten temperaturgradient. Verdiene utgjør 7-17 % av isolasjonstykkelsen, $t_{\text{isolasjon}}$, som er markert med en rød strek ved $3750\ \mu\text{m}$. Den blå linja representerer strekksonen i den bøyde kabelen, og har høyere estimerte verdier av l_{max} enn de andre linjene som representerer kompresjonssonen i bøyde kabel og strekk- og kompresjonssonen i rett kabel. Det indikerer at det er sannsynlig å finne lengre trær i strekksonen.

Figur 4.15 b) viser at de estimerte verdiene for bowtie-trær aldret med temperaturgradient er høyere enn i Figur 4.15 a). Verdiene til l_{max} utgjør 26-69 % av $t_{\text{isolasjon}}$. Verdiene for strekksonen i den bøyde kabelen er lavest.

Med 95 % sannsynlighet finnes det ventilerte trær ved indre halvleder med maksimal lengde større enn verdiene for l_{max} gitt i Figur 4.16.

Det er kun laget graf med estimerte verdier av l_{\max} av ventilerte trær i kabler aldret i 6 og 9 uker med unntak av for kompresjonssonen i de bøyde kablene. Forekomsten av ventilerte trær i de andre kablene var for lav til å få verdier som kunne plottes på ekstremalverdi-papir.



Figur 4.16: Estimerte verdier av l_{\max} for ventilerte trær ved indre halvleder i 1 meter lang kabel ($\phi=0,95$).

Figur 4.16 viser at de estimerte verdiene av l_{\max} er høyere enn 75 % av isolasjonstykkelsen for de rette kablene. De estimerte verdiene til trærne i strekksonen i de bøyde kablene krysser den oransje linja ved 75 % av isolasjonstykkelsen.

Den grafiske fremstillingen i Figur 4.16 angir hvor nær de estimerte verdiene av l_{\max} med $\phi=0,95$, i 1 meter lang kabel, er ved å krysse isolasjonsveggen. Den største estimerte verdien av l_{\max} er for rett kabel aldret med temperaturgradient i 9 uker (strekksone), med $l_{\max}=3330 \mu\text{m}$. Det innebærer at med 95 % sannsynlighet vil det finnes et vanntre som vil vokse gjennom 89 % av isolasjonstykkelsen etter 9 uker i 1 meter lang kabel. Den laveste estimerte verdien av l_{\max} er i strekksonen i den bøyde kabelen aldret i 6 uker, med $l_{\max}=2430 \mu\text{m}$. Det tilsvarer 65 % av isolasjonstykkelsen.

Det er dokumentert at virkningen av temperaturgradient også vises i estimerte verdier av l_{\max} , da de estimerte verdiene er høyere i kablene aldret med $\Delta T=16,5 \text{ K}$ enn i kablene aldret med $\Delta T=0$.

4.2 Resultater fra eksperimentet med dynamisk mekanisk belastede kabler

Alle resultatene er fra kabelobjekter aldret med $U=2U_0$ i 3 uker i den dynamiske testtriggen. Temperaturen på vannet rundt kabelobjektene var $30 \text{ }^\circ\text{C}$.

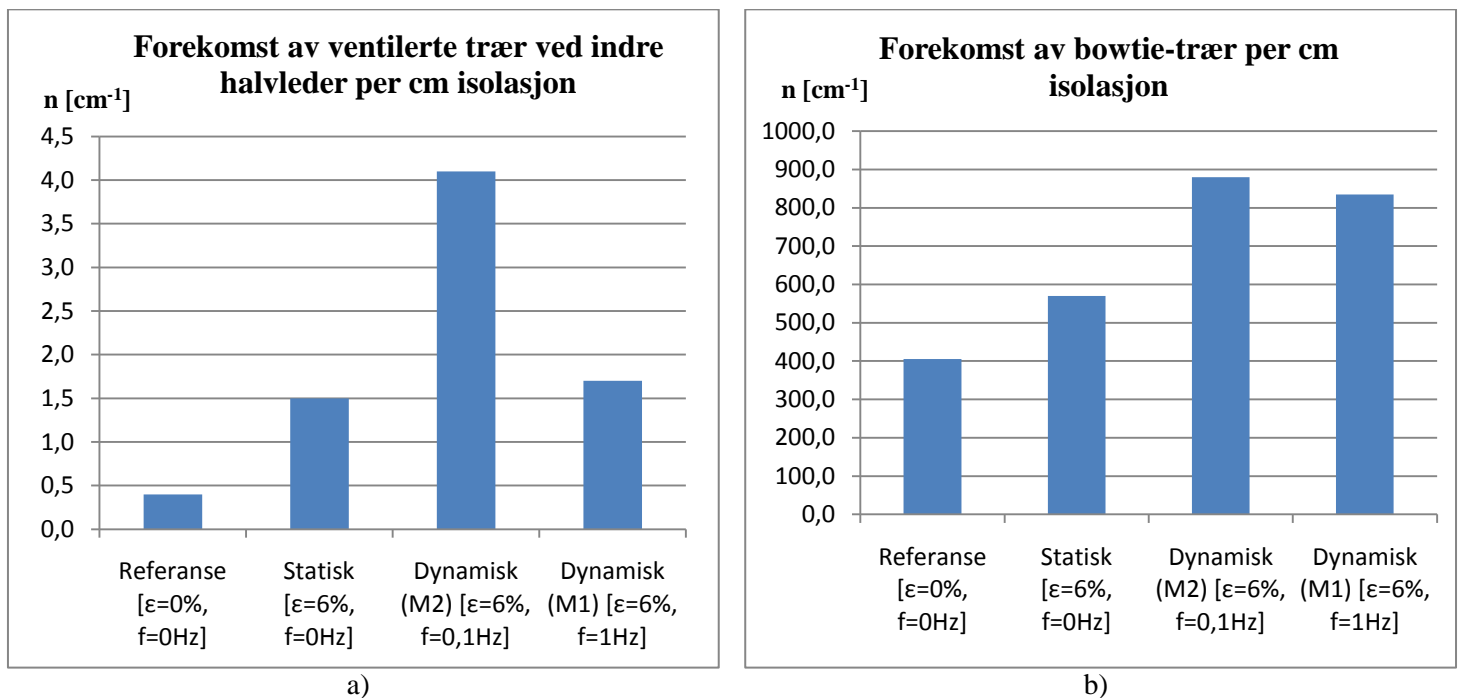
4.2.1 Forekomst av vanntrær per cm isolasjon

Tabell 4.3 angir analysert isolasjonslengde for ventilerte trær og bowtie-trær for hver kabel.

Tabell 4.3: Analysert isolasjonslengde for ventilerte trær og bowtie-trær i forsøket med dynamisk mekanisk belastning.

| Type kabel | Aldringstid [uker] | Analysert isolasjonslengde for ventilerte trær [mm] | Analysert isolasjonslengde for bowtie-trær [mm] |
|--|--------------------|---|---|
| $\varepsilon=0\%$, $f=0\text{ Hz}$ Referanse | 3 | 49,2 | 2,0 |
| $\varepsilon=6\%$, $f=0\text{ Hz}$ Statisk | 3 | 40,0 | 2,0 |
| $\varepsilon=6\%$, $f=0,1\text{ Hz}$ Dynamisk (M2) | 3 | 44,4 | 2,0 |
| $\varepsilon=6\%$, $f=1\text{ Hz}$ Dynamisk (M1) | 3 | 52,8 | 2,0 |

Figur 4.17 viser forekomsten av vanntrær per cm isolasjon, henholdsvis ventilerte trær ved indre halvleder i Figur 4.17 a) og bowtie-trær i Figur 4.17 b). Verdiene benyttet til den grafiske fremstillingen er hentet fra Tabell A.16 i Appendiks 7.



Figur 4.17: Forekomsten av ventilerte trær ved indre halvleder (a) og forekomsten av bowtie-trær (b).

Figur 4.17 a) viser at forekomsten av ventilerte trær ved indre halvleder per cm isolasjon er størst, med $n=4,1$ trær per cm isolasjon, i kabelen som ble dynamisk mekanisk belastet av motoren med $f=0,1\text{ Hz}$ (M2). Lavest forekomst er det i den ubelastede referansekabelen, med $n=0,4$ trær per cm isolasjon. Sett i forhold til referansekabelen er

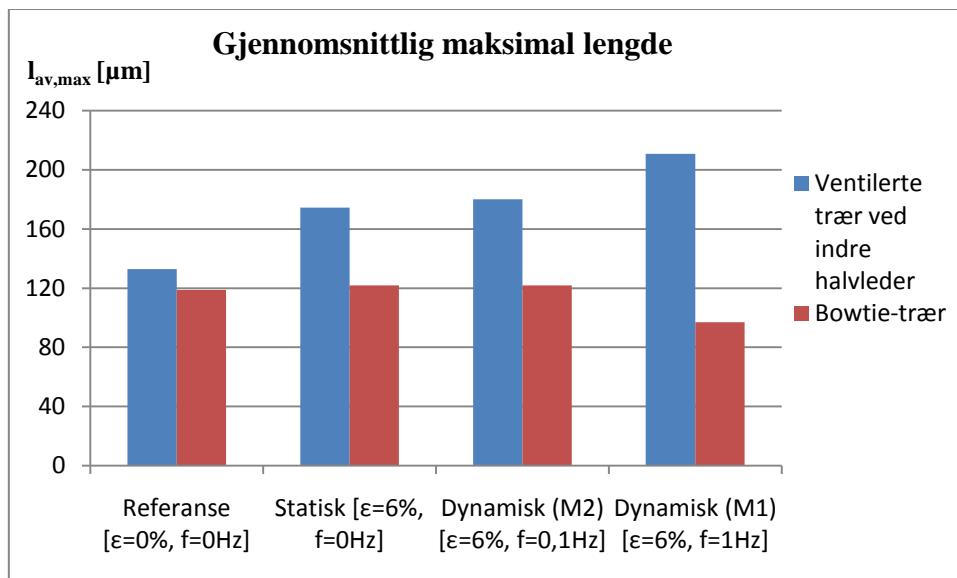
forekomsten av ventilerte trær ved indre halvleder 3,8 til 10,3 ganger høyere i de mekanisk belastede kablene.

Figur 4.17 b) viser at forekomsten av bowtie-trær er lavest i referansekabelen der $n=405$ trær per cm isolasjon. Høyest forekomst av trær er det i den dynamisk belastede kabelen belastet av M2, med $n=880$ trær per cm isolasjon. Sett i forhold til referansekabelen er forekomsten av bowtie-trær 1,4 til 2,2 ganger høyere i de mekanisk belastede kablene.

Det ble kun gjort funn av ventilerte trær ved ytre halvleder i kabelen som ble dynamisk mekanisk belastet av motoren med $f=0,1$ Hz (M2).

4.2.2 Gjennomsnittlig maksimal lengde

Figur 4.18 viser gjennomsnittlig maksimal lengde av både ventilerte trær ved indre halvleder og bowtie-trær. Verdiene benyttet til den grafiske fremstillingen er hentet fra Tabell A.16 i Appendiks 7.



Figur 4.18: Gjennomsnittlig maksimal lengde av vanntrær.

Figur 4.18 viser at $\overline{l_{\max}}$ av bowtie-trær er tilnærmet lik i alle kablene med unntak av kabelen belastet av motoren med $f=1$ Hz (M1) hvor $\overline{l_{\max}}$ er omtrent 20 % lavere enn i de andre kablene.

Den gjennomsnittlige lengden av ventilerte trær ved indre halvleder er fra 31-59 % lengre i de mekanisk belastede kablene enn i referansekabelen. Den største verdien av $\overline{l_{\max}}$ er i kabelen belastet av motoren med $f=1$ Hz (M1), der $\overline{l_{\max}}=210,9$ μm .

Det er dokumentert at mekanisk belastede kabler aldret med elektrisk påkjenning har større forekomst av både ventilerte trær og bowtie-trær enn kabler aldret uten mekanisk belastning.

Det er insignifikant forskjell i gjennomsnittlig maksimal lengde av bowtie-trær i mekanisk belastede kabler sammenlignet med ubelastet kabel, mens $\overline{l_{\max}}$ for ventilerte trær ved indre halvleder er lengre i mekanisk belastede kabler enn i den ubelastede kabelen.

4.2.3 Estimerte verdier av maksimal vanntrelengde

Ved bruk av ekstremalverdistatistikk er parametrene i ligning (3.2) og korresponderende 5 %, 50 % og 95 % sannsynlighet for at den maksimale vanntrelengden til bowtie-trær i en 1 meter lang kabel overstiger den gitte verdien av l_{\max} beregnet. Tabell 4.4 viser de beregnede verdiene. Den kumulative sannsynlighetsfordelingen ble plottet på ekstremalverdipapir. Plottene er vedlagt i Appendiks 14. Mer informasjon om ekstremalverdistatistikk og hvordan det benyttes i praksis er vedlagt i Appendiks 4.

Tabell 4.4: Parametre fra ligning (3.2) beregnet fra sannsynlighetsfordelingen og korresponderende 5 %, 50 % og 95 % sannsynlighet for at den maksimale vanntrelengden i en 1 m lang kabel overstiger den gitte verdien av l_{\max} .

| Bowtie-trær. 3 uker aldringstid, T=30 °C $\Delta T=0$ | | | | | |
|---|------------------------|---------|---|-----|-----|
| Type kabel | v [μm] | β | l_{\max} [μm] i en 1 m lang kabel | | |
| | | | 95% | 50% | 5% |
| $\varepsilon=0\%$, f=0Hz Referanse | 117,5 | 96,3 | 360 | 410 | 500 |
| $\varepsilon=6\%$, f=0Hz Statisk | 107,5 | 78,1 | 410 | 470 | 580 |
| $\varepsilon=6\%$, f=0,1Hz Dynamisk (M2) | 112,0 | 158,0 | 260 | 300 | 350 |
| $\varepsilon=6\%$, f=1Hz Dynamisk (M1) | 74,0 | 88,2 | 340 | 400 | 500 |

Den estimerte verdien av l_{\max} i den ubelastede kabelen (referansekabelen) med $\varphi=0,95$ er høyere enn verdiene estimert for kablene med dynamisk mekanisk påkjenning. Sammenlignet med kabelens isolasjonstykkelse utgjør de estimerte verdiene 7-11 % av isolasjonstykkelsen, beregnet med $\varphi=0,95$.

Analysen av kabelisolasjonen viste liten forekomsten av ventilerte trær ved indre halvleder per cm isolasjon og var for lav til å få verdier som kunne plottes på ekstremalverdipapir.

5 Diskusjon

I dette kapitlet diskuteres resultatene, metodene, innvirkningen av testforhold og feilkilder. De nevnte temaene er inndelt i underkapitler.

5.1 Evaluering av resultatene

Ventilerte trær ved *indre* halvleder blir omtalt i delkapittel 5.1 som ”ventilerte trær”, da forekomsten av ventilerte trær ved *ytre* halvleder er insignifikant sammenlignet med forekomsten av ventilerte trær ved indre halvleder. Der ventilerte trær i ytre halvleder diskuteres er det tydelig merket.

5.1.1 Statisk mekanisk belastning av kabler

Vanntrevekst i kabler belastet med strekk- og kompresjonskrefter

Paximadakis og Patsch dokumenterte at forekomsten av ventilerte trær i 20 mm^3 var større i strekksonen enn i kompresjonssonen [15]. De viste også at den gjennomsnittlige lengde av ventilerte trær var større i den delen av kablen som var belastet med strekkrefter. For å kunne sammenligne resultatene antas det at økningen i gjennomsnittlig vannrelengde er proporsjonal med økningen i gjennomsnittlig *maksimal* vannrelengde i kabler belastet med strekkrefter.

Nordås m.fl. viste at forekomsten av ventilerte trær var prosentvis større i delen av isolasjonen belastet med strekkrefter i forhold til delen utsatt for kompresjonskrefter [6]. De dokumenterte også at gjennomsnittlig maksimal lengde av ventilerte trær ved indre halvleder var økte med økt statisk mekanisk belastning.

Bulinski og Bamji viste at lengden av ventilerte trær var størst når strekkprosenten, ϵ , var 10-30 % [10]. I Appendix 2 er strekkprosenten for kabler med bøylediameter lik 50 mm beregnet til å være 28,9 %. Etersom den beregnede strekkprosenten er i det ytterste punktet på de bøyde kablene antas det at det er den maksimale strekkprosenten. Verdien virker derfor å passe inn i det nevnte intervallet.

Ildstad m.fl. dokumenterte at forekomsten av ventilerte trær var størst i delen av isolasjonen som var belastet med strekkrefter og at belastningen gav økning i vekstraten av ventilerte trær [7].

Resultatene i Figur 4.1 og Figur 4.3 dokumenterer at forekomsten av ventilerte trær per cm isolasjon er større i de delene av kablene som er belastet med strekkrefter enn i de delene av kablene som er belastet med kompresjonskrefter. I tillegg viser resultatene i Figur 4.5 at gjennomsnittlig maksimal lengde av ventilerte trær er større i strekksonen. Dette styrker antakelsen, beskrevet i hypotesen i delkapittel 1.4, om at strekkreftene virker i samme retning som Maxwell-kreftene slik at det kreves lavere energi for å bryte

polymerkjedene i isolasjonen. Resultatene dokumentert i delkapittel 4.1.1 om vekst av ventilerte vantrær i kabler belastet med strekkrefter samsvarer med resultater fra tidligere eksperimenter.

Paximadakis og Patsch dokumenterte at 90 % av bowtie-trærne ble funnet i den delen av kablen som ble belastet med strekkrefter og at lengden av bowtie-trærne var lengst i denne delen [15]. Resultatene som ble presentert i artikkelen av Nordås m.fl. viste også økning i forekomst og gjennomsnittlig maksimal lengde av bowtie-trær i strekksonen [6].

Bulinski og Bamji viste derimot at effekten av strekkrefter ikke påvirket lengden av bowtie-trær i særlig grad [10].

Resultatene i Figur 4.2, Figur 4.4 og Figur 4.6 dokumenterer at forekomsten av bowtie-trær i strekksonen er større eller lik forekomsten av bowtie-trær i kompresjonssonen og at gjennomsnittlig maksimal lengde av bowtie-trær er størst i strekksonen. Dette samsvarer med resultatene i [6] og [15]. Det antyder at strekkreftene lettere gir sprekke-dannelser også i midten av isolasjonen.

Resultatene beskrevet i delkapittel 4.1.1 verifiserer både hypotesen, i delkapittel 1.4, og resultater fra tidligere lignende eksperimenter. Det indikerer at vanntreveksten i nyere kabler påvirkes av mekanisk påkjenning, i form av strekkrefter, på lik linje med det som er påvist i eldre kabeltyper.

I hypotesen i delkapittel 1.4 er det antatt at innføringen av kompresjonskrefter reduserer sprekke-dannelser fordi kreftene virker motsatt retning av Maxwell-kreftene. Resultatene i delkapittel 4.1.1 indikerer også at denne antagelsen stemmer. Ettersom forekomst og gjennomsnittlig maksimal lengde av vantrær er størst i strekksonen er naturlig nok forekomst og gjennomsnittlig maksimal lengde av vantrær redusert i de delene av kablen belastet med kompresjonskrefter.

Det er viktig å påpeke at i dette diskusjonskapittelet har strekk- og kompresjonssonene blitt sammenlignet med hverandre. Det kan ikke konkluderes fra diskusjonen i dette kapittelet om kabler belastet med strekkrefter gir *akselerert* vanntrevekst og om kabler belastet med kompresjonskrefter gir *redusert* vanntrevekst sett i forhold til ubelastede kabler. Dette temaet diskuteres i et annet delkapittel.

Vanntrevekst i kabler aldret med og uten temperaturgradient

Teorien i delkapittel 2.3 forklarte at polymerisolasjon med temperaturgradient gav overmetning av vann i isolasjonen. I tillegg var det referert til rapporter som har konkludert med at kabler med temperaturgradient og elektrisk påkjenning gav økt vanntrevekst [5, 25].

Resultatene i Figur 4.7 og Figur 4.9 dokumenterer at kabler aldret med temperaturgradient får en signifikant økning i både forekomst og gjennomsnittlig maksimal lengde av ventilerte trær.

I en artikkel skrevet av Sletbak og Ildstad ble det konkludert med at bowtie-trærne viste en dramatisk økning i tetthet, gjennomsnittlig maksimal lengde og vekstrate i kabler aldret med vann i varm leder kombinert med temperaturgradient i kabelen [25]. Artikkelen ble publisert i 1983, og det antas at kvaliteten på kablene var dårligere enn dagens kabler.

Årsaken til at det ble valgt en annen analysemetode for bowtie-trær i kabler aldret med temperaturgradient er begrunnet med at forekomsten var stor og signifikant større enn i kabler aldret uten temperaturgradient. For å vise forskjellen er det lagt ved bilder i Appendiks 18. Begrunnelsen for valg av analysemetode er dermed også en forklaring på at tettheten av bowtie-trær var signifikant større i kablene med temperaturgradient.

Gjennomsnittlig maksimal lengde av bowtie-trær i resultatene i Figur 4.10 viser en signifikant økning i \bar{l}_{\max} i kabler aldret med kombinasjon av vann i varm leder og temperaturgradient i kablene. Dette samsvarer med resultatene til Sletbak og Ildstad [25].

At resultatene i denne rapporten samsvarer med resultatene i [25] indikerer at selv om kvaliteten av kablene er antatt bedre i dag sammenlignet med kablene på 1970- og 1980-tallet er effekten av temperaturgradient signifikant også i nyere kabler.

Antagelsen gjort i hypotesen i delkapittel 1.4 verifiseres derfor av de dokumenterte resultatene i delkapittel 4.1.2. Det kan derfor antas at kondensasjonen av vann i isolasjonen nær den varme lederen gir en konsentrasjonsgradient som fører til at mer vann kommer inn fra den ene siden av isolasjonen enn det vannet som diffunderer ut på andre siden slik at konsentrasjonen av vann i midten av isolasjonen blir høy. Konsekvensen av det høye vanninnholdet i isolasjonen kombinert med elektrisk påkjenning av kabelen gir signifikant økning i forekomst og gjennomsnittlig maksimal lengde av både ventilerte trær og bowtie-trær.

Utvikling av gjennomsnittlig maksimal lengde over tid

Da det er gjort analyse av flere prøveuttak ved ulike tid i dette eksperimentet er det interessant å studere utviklingen av gjennomsnittlig maksimal lengde som funksjon av aldringstiden.

Figur 2.2 i delkapittel 2.4.3 viser utviklingen av lengden av vanntreer som funksjon av tid. Resultatene grafen baserer seg på er fra kabler som er aldret i opptil 20 år. Tiden kablene er aldret i dette eksperimentet er, til sammenligning, veldig kort. Derfor kan ikke utviklingen av gjennomsnittlig maksimal lengde sammenlignes direkte mot Figur 2.2 ettersom resultatene kun utgjør en liten del innerst på x-aksen i figuren. Det var likevel forventet at verdien av gjennomsnittlig maksimal lengde ville øke med økt aldringstid

basert på resultatene i en artikkel skrevet av Sletbak og Ildstad [25]. Gjennomsnittlig maksimal lengde av både ventilerte trær og bowtie-trær ble presentert som funksjon av aldringstiden med aldringstid opptil 780 timer.

Bulinski og Bamji viste også at lengden av ventilerte trær økte som funksjon av tiden, selv med kort aldringstid (340 timer) [10].

Figur 4.11 og Figur 4.12 dokumenterer at gjennomsnittlig maksimal lengde av henholdsvis ventilerte trær og bowtie-trær øker med økt aldringstid. Resultatene bekrefter dermed med antagelsen som ble gjort i hypotesen i delkapittel 1.4.

Vanntrevekst ved ulike temperaturforhold

Resultatene i Figur 4.13 dokumenterer at forekomsten av ventilerte trær er større i kabler aldret ved $T=30\text{ }^{\circ}\text{C}$ enn i kabler aldret ved $T=60\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Relaksasjonen i PEX-isolasjon er avhengig av temperatur. Stivhetsmodulen (eng. the shear modulus), G , for PEX avtar med økende temperatur [11]. Reduksjonen i forekomst av ventilerte trær ved $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ kan ha sammenheng med at isolasjonen har blitt mykere og at sprekkdannelser av den grunn blir redusert.

Gjennomsnittlig maksimal lengde av bowtie-trær i kabler aldret med temperaturgradient er observert størst i kablene aldret ved $T=60\text{ }^{\circ}\text{C}$. Resultatene kan tyde på at det er kombinasjonen av høy temperatur og temperaturgradient som bidrar til større gjennomsnittlig maksimal lengde av bowtie-trær, og ikke temperaturen alene. Kombinasjonen antas å kondensere mer vann i sprekkdannelsene og føre til raskere vekst av bowtie-trær.

Årsaken til at gjennomsnittlig maksimal lengde av ventilerte trær i kabler aldret med temperaturgradient ikke viser samme utvikling som for bowtie-trær kan ha sammenheng med at vannkonsentrasjonen er størst i midten av isolasjonen.

Vanntrevekst i statisk mekanisk belastet kabel sammenlignet med ubelastet kabel

I dette delkapittelet diskuteres det om påkjenning av strekkrefter på kabler *akselererer* vanntreveksten og om påkjenning av kompresjonskrefter på kabler *reduserer* vanntreveksten. Vanntrevekst, i form av forekomst og gjennomsnittlig maksimal lengde, sammenlignes derfor mellom statisk mekanisk belastede kabler og ubelastede kabler.

Resultater fra tidligere eksperimenter hevder at strekk- og kompresjonskrefter henholdsvis akselererer og reduserer vanntrevekst [7, 10, 15, 16]. Det er viktig å presisere at i disse eksperimentene er ikke vanntreveksten sammenlignet mellom mekanisk belastet kabel og ubelastet kabel. Sammenligningen er mellom kabel belastet med strekkrefter og kabel belastet med kompresjonskrefter.

Lindseth og Nordås fant i sine forsøk med statisk mekanisk belastede kabler aldret ved $T=30\text{ °C}$ en økning i både forekomst og gjennomsnittlig maksimal lengde av ventilerte trær ved indre halvleder i strekksonen i bøyde kabler sammenlignet med ubelastet kabel [5, 6].

Resultatene presentert i Figur 4.14 dokumenterer at innføring av strekkrefter ikke øker forekomsten av ventilerte vanntrær, men at forekomsten av bowtie-trær øker i flere av kablene.

Hva gjelder gjennomsnittlig maksimal lengde av ventilerte vanntrær og bowtie-trær så viser resultatene i Figur 4.11 og Figur 4.12 at $\overline{l_{\max}}$ er større i strekksonene i bøyde kabler enn i ubelastede kabler, der kablene er aldret *uten* temperaturgradient. I kablene aldret *med* temperaturgradient er $\overline{l_{\max}}$ lavere i strekksonen sammenlignet med de ubelastede kablene.

I antagelsene gjort i hypotesen i delkapittel 1.4 var det forventet lengre vanntrær i kablene belastet med strekkrefter. Resultatene i denne rapporten bekrefter denne hypotesen. Det ble også antatt at forekomsten av vanntrær ville øke i den delen av kabelen som belastes med strekkrefter. Resultatene dokumentert i denne rapporten angir at denne antakelsen ikke stemmer for ventilerte trær.

Antagelsen om at kompresjonskreftene, som belaster en kabel, vil ha motsatt retning av Maxwell-kreftene og dermed vil redusere vanntreveksten i den delen av kabelen, blir styrket av resultatene dokumentert i denne rapporten. Resultatene viser redusert forekomst av ventilerte trær i den delen av kabelen som var belastet med kompresjonskrefter og forekomsten av bowtie-trær er redusert i kablene aldret uten temperaturgradient.

Resultatene i delkapittel 4.1.3 indikerer at innføringen av kompresjonskreftene reduserer gjennomsnittlig maksimal lengde av vanntrær. Både gjennomsnittlig maksimal lengde av ventilerte trær og bowtie-trær er redusert sammenlignet med gjennomsnittlig maksimal lengde av vanntrær i ubelastede kabler.

Sett i forhold til ubelastede kabler får kabler belastet med strekkrefter *akselerert* vanntrevekst i form av lengre vanntrær. I de delene av kablene som belastes med kompresjonskrefter *reduseres* vanntreveksten i form av redusert vanntrélengde og forekomst av både ventilerte trær og bowtie-trær.

Vekst av ventilerte trær ved ytre halvleder

Slik det ble påpekt i delkapittel 3.3.2 er $E_{\min} > E=1\text{ kV/mm}$, som er den laveste feltstyrken som er påvist å gi vanntrevekst [12]. Det var derfor forventet å observere tilfeller av ventilerte trær ved ytre halvleder.

Forekomsten av ventilerte trær ved ytre halvleder var forventet å være lav sammenlignet med forekomsten av ventilerte trær ved indre halvleder. Denne antagelsen ble gjort i hypotesen i delkapittel 1.4 og var begrunnet med resultatene som ble dokumentert av Nordås, der kun 2 % av alle ventilerte vanntrær ble observert ved ytre halvleder [9].

Hypotesen bekreftes med resultatene i delkapittel 4.1.6 fra begge eksperimentene med statisk mekanisk belastning av kabler, da forekomsten av ventilerte trær utgjør mellom 0-6 % av alle ventilerte trær.

Årsaken til den lave forekomsten er antatt å ha sammenheng med to faktorer. Den ene er at den elektriske feltstyrken er lavest ved ytre halvleder, med $E_{\min}=1,6$ kV/mm. Sammenlignet med E_{\max} , ved indre halvleder, er den elektriske feltstyrken redusert med 70 % ved ytre halvleder. Ligning (2.2) viser at den elektriske feltstyrken er proporsjonal med Maxwell-kreftene. Reduksjonen av elektrisk feltstyrke på 70 % vil dermed gi tilsvarende reduksjon av Maxwell-kreftene.

Den andre faktoren er at de interne strekkreftene som oppstår i isolasjonen under produksjonen av kablen antas å være størst nær lederen. Som det ble nevnt i teorien i delkapittel 2.2 antas det at disse interne strekkreftene lettere gir sprekkdannelse i isolasjonen.

Evaluering av estimerte verdier av maksimal vanntrelengthe

Da lange vanntrær kan redusere holdespenningen til kablen ble resultatene med de estimerte verdiene av maksimal vanntrelengthe med $\phi=0,95$ i 1 meter lang kabel presentert slik at de kunne vurderes i forhold til isolasjonstykkelsen, se Figur 4.15 og Figur 4.16.

De estimerte verdiene samsvarer godt med verdiene for gjennomsnittlig maksimal lengde av vanntrærne. Estimerte verdier for kabler aldret med temperaturgradient viser en signifikant økning i verdien av maksimal vanntrelengthe, l_{\max} , sammenlignet med kabler aldret uten temperaturgradient.

Det er dokumentert at det med 95 % sannsynlighet finnes et ventilert tre som er lengre enn 89 % av isolasjonstykkelsen etter 9 ukers aldringstid. 9 uker er kort tid sammenlignet med forventet levetid til en kabel. Ettersom kabelens holdespenning kan reduseres av lange ventilerte trær, slik det er dokumentert i [20], kan resultatet tyde på at kabler aldret med kombinasjon av vann i varm leder og temperaturgradient i kablen kan få redusert levetid.

5.1.2 Dynamisk mekanisk belastning av kabler

Vanntrevekst i mekanisk belastede kabler

Resultatene i Figur 4.17 dokumenterer at mekanisk belastede kabler har signifikant større forekomst av vanntrær, både ventilerte trær og bowtie-trær, enn ubelastede kabler. I

hypotesen i delkapittel 1.4 ble det antatt at frekvensen til den mekaniske belastningen på kablene ville ha betydning på vanntreveksten, i form av at økt frekvens gav økt vanntrevekst. Grunnlaget for antagelsen er at slitasjonen på kabelen antatt er større når den belastes med strekkrefter med høy frekvens i forhold til en kabel som belastes med lav frekvens. Altså gikk antagelsen ut på at vanntreveksten skulle være større i de dynamisk mekanisk belastede kablene enn i den statisk mekanisk belastede kabelen, og at vanntreveksten skulle være størst i kabelen belastet av motoren med $f=1$ Hz. Resultatene i denne rapporten gir grunnlag for å anta at *frekvensen* av den mekaniske belastningen på kablene *ikke* har betydning på vanntreveksten.

Resultatene i Figur 4.18 viser en signifikant økning i gjennomsnittlig maksimal lengde av ventilerte trær i kabler som er aldret med mekanisk og elektrisk påkjenning.

Fra det som er dokumentert i tidligere eksperimenter, med kabler belastet med statisk mekaniske strekkrefter, og i eksperimentet med statisk mekanisk belastning av kabler i denne rapporten i Figur 4.12 a) er det grunnlag for å anta at de påkjente strekkreftene skulle gitt en økning i gjennomsnittlig maksimal lengde for bowtie-trær, men resultatene i Figur 4.18 dokumenter at den mekaniske belastningen *ikke* gir økning i gjennomsnittlig maksimal lengde av bowtie-trær.

Vanntreveksten i kabler aldret med mekanisk belastning i 3 uker er antatt ikke å påvirke kabelens levetid. Både forekomst og spesielt lengden av vanntrærne er liten. Med disse resultatene er det dermed ikke grunnlag for å komme med forslag til endring av designet til kabelen. Men dersom det er ønskelig å unngå vanntrevekst, kan løsningen være en korrugert kobberkappe tilsvarende den ABB produserte til Gjøa-plattformen, se delkapittel 1.2.3.

Vekst av ventilerte trær ved ytre halvleder

Kun i kabelen med dynamisk mekanisk belastning med $f=0,1$ Hz ble det observert ventilerte trær ved ytre halvleder. Årsakene til den lave forekomsten av ventilerte trær ved ytre halvleder antas å være de samme som ble indikert i diskusjonkapittelet om ventilerte trær i ytre halvleder i kabler aldret med statisk mekanisk belastning.

5.2 Evaluering av metodene

5.2.1 Bruk av ekstremalverdistatistikk

Å måle lengden til det lengste treet per snitt i et visst antall snitt og bruke resultatene i en ekstremalverdidistribusjon er langt mindre tidkrevende enn andre metoder. Flere snitt kan analyseres på like lang analysetid med god statistisk pålitelighet. Et eksempel på en annen metode vil være å undersøke antall trær og måle lengden til alle trærne i en bestemt kabellengde. I analysen er det hele tiden forsøkt å oppfylle kravet om mer enn 10 trær per

prøve, $n \geq 10$, innenfor rimeligheten. Derfor er det variasjoner i antall snitt som er analysert. I doktorgradavhandlingen til Erling Ildstad hevdes det at 25 snitt vil være tilstrekkelig for å bestemme parametrene til distribusjonen [24]. I eksperimentene beskrevet i denne rapporten har vanntreveksten vært lav slik at antall snitt som behøves er betydelig høyere, helt opptil 370 snitt. De tilfeller hvor veksten var beskjedent og tolkningen av resultatene underveis viste at 500 eller mer snitt var nødvendig for å bestemme parametrene til distribusjonen, ble analysen stoppet. Konsekvensen ble ingen sannsynlighetsdistribusjon for disse kablene.

Da det er sammenheng mellom maksimal vanntrelengde i en kabel og kabelsammenbrudd er metoden veldig relevant siden den fokuserer på det lengste treet i hvert snitt.

5.2.2 Mikroskopanalyse

Slik det tidligere er beskrevet var forekomsten av sløyfetrær vesentlig større i kabler aldret med temperaturgradient enn i kablene uten temperaturgradient. Den valgte metoden med å studere antall trær i 1 mm^2 førte til at veldig mange små trær ble talt som vanligvis ikke vil bli talt. Deteksjonsgrensen gikk ned fordi alt fokuset var på et veldig lite område.

Fordi det ble brukt to forskjellige analysemetoder kunne ikke forekomsten av trær per cm kabel, $n [\text{cm}^{-1}]$, sammenlignes med forekomsten av trær per kubikkmillimeter, $n [\text{mm}^{-3}]$.

5.3 Innvirkning av testforhold

5.3.1 Temperaturgradient

Vanntreveksten viser seg å være sterkt avhengig av temperaturgradient. Temperaturgradienten fører til evig akkumulasjon av vann i isolasjonen nær lederen, og rask vekst av vanntreer. Temperaturgradienten ble teoretisk beregnet for så målt i et eget eksperiment. Disse beregningene og målingene er vedlagt i Appendiks 1.

5.3.2 Vann i leder

Å ha lederkanalen fylt med vann er uønsket for kabler i drift, fordi skadene er såpass store. Men det er effektivt for rask vanntrevekst, når det er ønskelig i eksperimenter.

5.3.3 Strekkrefter i forsøket med statisk mekanisk belastning av kabler

50 mm bøylediameter for kablene gir kraftig tøyning av isolasjonen. På det meste er strekkprosenten 29 %. Så høy belastning vil ikke noen kabel bli belastet med, selv under installasjon, men i forsøkssammenheng er det interessant å studere ekstreme tilfeller av den parameteren som skal undersøkes.

5.3.4 Strekkrefter i forsøket med dynamisk mekanisk belastning av kabler

Det er dokumentert mange og store slitasjeskader på den dynamiske testtriggen. Det gir grunnlag for å konkludere med at belastningen på testtriggen var for stor. Motorene og akslingene var ikke dimensjonert for denne belastningen. ϵ ble valgt til 6 % for å sammenligne resultatene med resultatene fra kabler med bøyediameter på 300 mm. Sammenligningen lot seg ikke gjøre. Den beregnede strekkprosenten gjelder for det ytterste punktet i de bøyde kablene. Analysemetoden var definert til å registrere verdier i hele strekksonen, og ikke bare i den delen av isolasjonen der strekkprosenten var størst. Dermed kunne ikke verdiene sammenlignes.

Strekkprosenten, $\epsilon=6$ %, er vurdert som stor sammenlignet med hva en dynamisk kabel i realiteten vil bli belastet med, 1-2 %, men ekstreme verdier kan benyttes i forsøks-sammenheng.

Utviklingen av gjennomsnittet til strekkreftene og utviklingen av maksimalverdien til strekkreftene kablene ble belastet med er vedlagt i Appendiks 16. Målingene viser at strekkreftene ved M1, motoren med $f=1$ Hz, er de eneste som reduseres som funksjon av tiden. Dermed er det kun strekkreftene ved M1 som antyder at isolasjonen har relaxert.

Det anbefales å redusere belastningen ved neste forsøk for å unngå slitasjeskader på testtriggen.

5.3.5 Vanntemperatur

Temperaturen ble mer stabil etter at temperaturen ble endret fra 30 °C til 60 °C i eksperimentet med statisk mekanisk belastning av kabler. Detaljer fra målingene av vanntemperaturen og temperaturen ved ytre halvleder er vedlagt i Appendiks 17.

5.4 Feilkilder

På grunn av slitasjeskader, spesielt ved motoren med $f=1$ Hz (M1), har aldringen blitt oppstykket. Den totale aldringstiden, 3 uker, er lik for alle kablene i den dynamiske testtriggen, men pausene i aldringen av kablene koblet til M1 kan ha innvirket på vanntreveksten med tanke på at forekomsten av ventilerte trær er noe lavere enn i kablene koblet til motoren med $f=0,1$ Hz (M2) og at gjennomsnittlig maksimal lengde av bowtie-trær er omtrent 20 % lavere for M1 sammenlignet med de andre kablene.

6 Konklusjon

I en tripplekstrudert PEX-kabel i vann med temperatur lik 30 °C utsatt for elektrisk og statisk mekanisk belastning, i form av strekk- og kompresjonskrefter, vil den delen av kabelen belastet med strekkrefter ha størst forekomst av vanntreer og de lengste vanntreerne. Strekkreftene akselererer vanntreveksten i form av økt forekomst og lengde av vanntreerne, sammenlignet med en ubelastet kabel. Kompresjonskreftene reduserer vanntreveksten.

I en tripplekstrudert PEX-kabel i vann med temperatur lik 60 °C utsatt for elektrisk og statisk mekanisk belastning, i form av strekk- og kompresjonskrefter, er det funnet at den delen av kabelen som er belastet med strekkrefter vil ha størst forekomst av vanntreer og de lengste vanntreerne.

Sammenlignet med en ubelastet kabel vil innføring av kompresjonskrefter i en kabel redusere vanntreveksten. Strekkrefter gir akselerert vanntrevekst i form av økt vanntrelengde i kabler aldret uten temperaturgradient og økt forekomst av bowtie-trær, men ikke i form av økt forekomst av ventilerte vanntreer eller vanntrelengde i kabler aldret med temperaturgradient.

PEX-kabler aldret med kombinasjon av vann i varm leder og temperaturgradient får akselerert vanntrevekst, i form av økt forekomst og lengre vanntreer. Ved bruk av ekstremalverdistatistikk er det dokumentert at det i kabler aldret med de nevnte forholdene med stor sannsynlighet vil eksistere ventilerte trær som nesten har vokst gjennom isolasjonsveggen etter kort tid.

Gjennomsnittlig maksimal lengde av ventilerte trær og bowtie-trær øker som funksjon av aldringstiden.

Forekomsten av ventilerte trær er dokumentert større i kabler aldret ved $T=30$ °C enn i kabler aldret ved $T=60$ °C.

Det er dokumentert fra eksperimentet med den dynamiske testtriggen at PEX-kabler utsatt for elektrisk og mekanisk belastning vil ha større forekomst av vanntreer sammenlignet med en kabel uten mekanisk belastning. Det er også dokumentert at lengden av ventilerte trær er større i de mekanisk belastede kablene, mens lengden av bowtie-trær er tilnærmet lik i alle kablene. Det er ingen signifikant forskjell i vanntrevekst i kabler som er aldret med statisk mekanisk belastning og dynamisk mekanisk belastning.

Utviklingen av strekkreftene i forsøket med dynamisk belastning av PEX-kabler ble målt og logget. Målingene av strekkreftene indikerer relaksasjon av isolasjonen i én av kablene.

7 Forslag til videre arbeid

Det kan være interessant eksperimentelt å undersøke hvordan vanntrevekst påvirkes av vanntemperaturen. Arbeidet kan bestå av å utføre målinger av elastisitetsmodulen og stivhetsmodulen til PEX-isolasjonen ved ulike temperaturene. For deretter å studere vanntreveksten i lys av de mekaniske endringene i PEX-isolasjonen som følge av temperaturendringene.

I denne rapporten er det dokumentert at det er kabler aldret med temperaturgradient som gir størst akselerasjon av vanntrevekst. Sannsynlighetsberegninger har vist at det med stor sannsynlighet vil finnes ventilerte trær som nesten har vokst gjennom isolasjonsveggen etter kort tid. Det kan derfor være interessant eksperimentelt å undersøke vanntrevekst med temperaturgradient som parameter.

I et nytt forsøk med den dynamiske testtriggen anbefales det å redusere den mekaniske belastningen. Kablene kan med fordel aldres i mer enn 3 uker. Testtriggen er konstruert med mulighet for å aldre to sett med kabler, slik at det kan tas prøveuttak ved to forskjellige tidspunkt.

8 Symbolliste

Symboler:

| | | |
|-----------------------------|---|--|
| U | - | spenning |
| U_0 | - | driftsspenning |
| R | - | motstand |
| I | - | strøm |
| P | - | effekt |
| f | - | frekvens |
| T | - | temperatur |
| T_{leder} | - | kabelens ledertemperatur |
| $T_{\text{ytre halvleder}}$ | - | temperatur ved kabelens ytre halvleder |
| ΔT | - | temperaturgradient |
| L | - | kabellengde |
| ΔL | - | endring av kabellengde |
| L_0 | - | analysert isolasjonslengde |
| ε | - | strekprosent |
| d | - | bøylediameter til kabel |
| σ | - | Maxwell krefter |
| E | - | elektrisk feltstyrke |
| ε | - | permittiviteten til et materiale |
| E_{min} | - | minimal elektrisk feltstyrke |
| E_{max} | - | maksimal elektrisk feltstyrke |
| D_i | - | kabelens indre diameter |
| D_o | - | kabelens ytre diameter |
| $t_{\text{isolasjon}}$ | - | isolasjonstykkelse |
| A_c | - | lederens tverrsnittsareal |
| A_i | - | isolasjonens tverrsnittsareal |
| F | - | strømningshastighet av vann per arealenhet |
| D | - | diffusjonskoeffisient |
| C | - | konsentrasjon av vann |
| D_0 | - | materialkonstant |
| E_D | - | aktiveringsenergi til diffusjon |
| R | - | gasskonstant |
| F | - | kraft |
| E | - | elastisitetsmodul |
| L | - | bølgelengde |
| g | - | tyngdeakselerasjon |
| T | - | periodetid for bølger |
| l_{max} | - | maksimal vanntrelengde |
| $\overline{l_{\text{max}}}$ | - | gjennomsnittlig maksimal vanntrelengde |
| $l_{\text{av,max}}$ | - | gjennomsnittlig maksimal vanntrelengde |

Benevnelser:

| | | |
|----|---|---------|
| K | - | kelvin |
| C | - | celsius |
| V | - | volt |
| A | - | ampere |
| W | - | watt |
| Hz | - | hertz |
| N | - | newton |
| Pa | - | pascal |

Symboler i ekstremalverdistatistikk:

| | | |
|-----------|---|--|
| $F(x)$ | - | asymptotisk funksjon til sannsynlighetsfordeling av ekstremalverdier |
| $W(x)$ | - | Weibullfordeling av ekstremalverdier |
| u | - | parameter for 36,8 % verdien i $F(x)$ |
| v | - | parameter for 36,8 % verdien i $W(x)$ |
| w | - | isolasjonstykkelsen (øvre grense for variabelen x) |
| x | - | variabelen i $F(x)$ og $W(x)$ tilsvarer l_{\max} |
| α | - | stigningstall, mål på spredning (parameter i $F(x)$) |
| β | - | stigningstall, mål på spredning (parameter i $W(x)$) |
| φ | - | symbol for sannsynlighet ved ekstrapolering |
| s | - | standardavvik |

9 Referanser

1. **Faremo, H., Ildstad, E. og Sletbak, J.:** *Water Treeing and Breakdown Strength Reduction of XLPE Insulation*. 1989.
2. **Gjørsv, Alexandra Bech:** StatoilHydro. *www.statoil.com*. [Internett]
<http://www.statoil.com/no/NewsAndMedia/News/2008/Downloads/StatoilHydro%20Hywind%20norsk%20presentasjon.pdf>.
3. **Teknisk Ukeblad:** *www.tu.no*. [Internett]
<http://www.tu.no/ons/article177228.ece>.
4. **Statoil:** *www.statoil.com*. [Internett]
<http://www.statoil.com/no/OurOperations/ExplorationProd/partneroperatedfields/Gjoea/Downloads/Brochure.pdf>.
5. **Lindseth, Truls Amundsen:** *Vanntrevekst i bøyde XLPE-kabler*. NTNU, Trondheim. 2010. **Vedlagt i ZIP-fil**.
6. **Ildstad, Erling, Nordås, Ståle og Lindseth, Truls Amundsen:** *Water Treeing of XLPE Cables under combined mechanical and electrical stress*. Department of Electric Power Engineering. Trondheim : NTNU, 2011. **Vedlagt i ZIP-fil**.
7. **Ildstad, E., et al.:** *Influence of Mechanical Stress and Frequency on Water Treeing in XLPE Cable Insulation*. 1990.
8. **Sletbak, J. og Ildstad, E.:** *The Effect of Service and Test Conditions on Water Tree Growth*. 1983.
9. **Nordås, S. og Ildstad, E.:** *The Influence of Strain on Water Treeing in XLPE Power Cables*. Department of Electric Power Engineering. Trondheim : NTNU, 2010.
10. **Bulinski, A., et al.:** *Water Treeing Degradation Under Combined Mechanical and Electrical Stresses*. Ottawa : National Research Council, Canada, 1992.
11. **Olasz, L. og Gudmundson, P.:** *Viscoelastic Model of Cross-Linked Polyethylene Including Effects of Temperature and Crystallinity*. *Mechanics of Time-Dependent Materials*. Springer, 2006.
12. **Ildstad, E.:** *Electric Power Engineering, High Voltage Insulating Materials*. 2009.
13. **Faremo, Hallvard:** *Power Cables - Service Experience*. [Forelesning]. NTNU, Trondheim : 22. September 2010.

14. **Sletbak, Jarle:** *The Mechanical Damage Theory of Water Treeing - a Status Report.* Department of El.Engineering and Computer Science. Trondheim : NTNU, 1991.
15. **Paximadakis, A. og Patsch, R.:** *The Influence of Mechanical Stress on Initiation and Growth of Bow-tie and Boudary Water Trees.* Inst. for Materials of Electrical Engineering. s.l. : University of Siegen, Germany, 1991.
16. **Patsch, Rainer og Paximadakis, Antonios:** *Water Trees in Cables - Experimental Findings and Theoretical Explanations.* University of Siegen, Germany, 1990.
17. **Billing, J.W.:** *Examination of Mechanical Stress in Extruded Polymer Cable Insulation Using Thermal Mechanical Analysis.* 1990.
18. **Griffiths, Carl L. og Batterigde, Steven:** *The Effect of Environmental Stress Cracking on Water Tree Growth.* Wrexham : BICC General Cables, 2000.
19. **Filippini, J. C.:** *Mechanical Aspects of Water Treeing in Polymers.* 1990.
20. **Hvidsten, Sverre, et al.:** *Correlation Between AC Breakdown Strength and Low Frequency Dielektric Loss of Water Tree Aged XLPE Cables.* Trondheim : NTNU, 1998.
21. **Sælen, Odd Henrik, Weber, Jan Erik og Redaksjonen:** Store Norske Leksikon. [Internett] 2009. www.snl.no/havbølger.
22. **GS Hydro:** *Nettside til GS Hydro.* [Internett] www.gshydro.com.
23. **Ildstad, E.:** *Cable Technology, High Voltage Equipment.* 2009.
24. **Ildstad, E.:** *Water Migration and Water Treeing in Cross-Linked Polyethylene Cables.* 1982.
25. **Sletbak, J. og Ildstad, E.:** *The Effect of Service and Test Conditions on Water Tree Growth in XLPE Cables.* 1983.
26. **British Standards:** *Electric Cables - Calculation of the current rating: Part 2: Thermal Resistance, IEC 60287-2-1:1994+A2 2006.*
27. **British Standards:** *Electric Cables - Calculation of the current rating, IEC 60287-1-1:2006.*

28. **Steennis, E.F., Boone, W. og Montfoort, A.:** *Water Treeing in Service Aged Cables, Experience and Evaluation Procedure.* 1990.
29. **Ildstad, E., Sletbak, J. og Bruaset, A.:** *Estimating the Maximum Length of Water Trees Using Extreme Value Statistics.* Trondheim : NTNU, 1991.
30. **Gumbel, E.J.:** *Statistical Theory of Extreme Values and Some Practical Applications. National Bureau of Standards, Applied Mathematics Series 33.* Washington D.C. 1954.

Appendiks

Appendiks 1 - Beregning av strøm og ledertemperatur

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 testeksperiment.

Beregning av termisk resistans og strøm

Den termiske resistansen ble beregnet med formler fra [23] og [26]. Temperaturen på vannet kunne bestemmes av et temperaturstyrt varmeelement. Temperaturen på vannet ble bestemt til å være 30 °C.

Den termiske resistansen til isolasjonen ble beregnet til:

$$T = \frac{\rho_T}{2\pi} \ln \frac{d_o}{d_c} = \frac{3,5}{2\pi} \ln \frac{21,2}{11,2} = 0,36 \text{ Km/W} \quad (\text{A1.1})$$

Temperaturgradienten ble valgt til 15 grader, uten videre begrunnelse annet enn at 15 grader var en verdi som var realistisk å oppnå. Med det som utgangspunkt kunne effekten som kreves for å gi denne gradienten beregnes:

$$P = \frac{\Delta T}{T} = \frac{15 \text{ K}}{0,36 \text{ Km/W}} = 42 \text{ W/m} \quad (\text{A1.2})$$

der $\Delta T = T_c - T_o$ (ledertemperatur – temperatur ved ytre halvleder).

Resistansen i et metall avhenger av temperaturen på metallet. Resistansen i lederen ved 30 °C ble beregnet i EXCEL, basert på formler fra IEC-standard [27]. Formlene regnearket er basert på er vedlagt i Appendiks 11. Resistansen i kobberlederen ved 30 °C ble beregnet til 0,2 Ω/km. Strømmen som må påtrykkes for å gi ønsket temperaturgradient ble dermed:

$$I = \sqrt{\frac{42 \text{ W/m}}{0,2 \cdot 10^{-3} \Omega/\text{m}}} = 458 \text{ A} \quad (\text{A1.3})$$

Testeksperiment for beregning av strøm og ledertemperatur

For å finne ut om den teoretisk beregnede strømmen ville gi temperaturgradient lik 15 grader ble det gjennomført et testeksperiment. Testforsøket ble gjennomført også for å være sikker på at kretsen ville fungere som den skulle uten å ødelegge kabelobjektene, og for å finne tiden det tar før temperaturen ble stabil både med og uten strøm gjennom lederen.

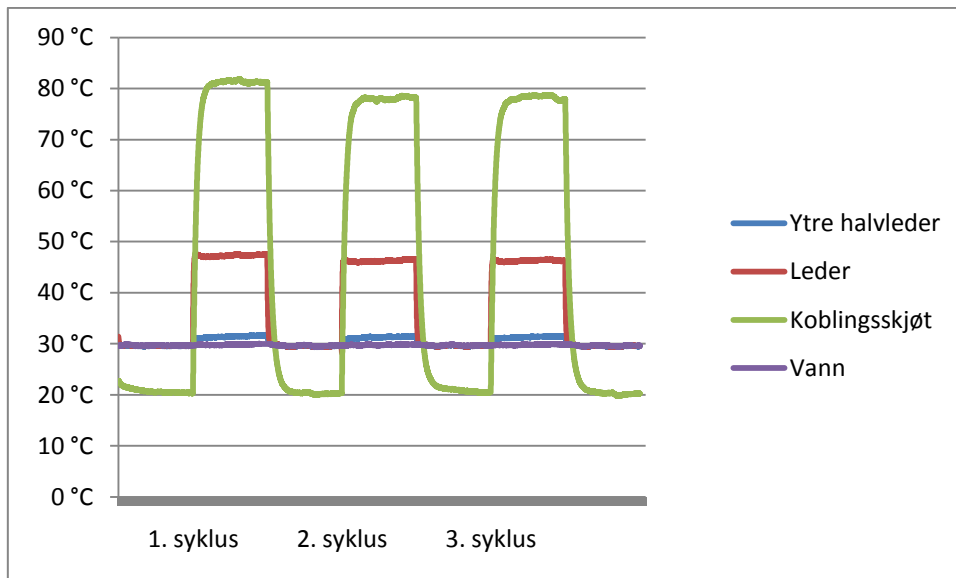
Testeksperimentet ble utført med en kabel på 2 meter. Kabelen ble kun påtrykt strøm. Fire temperatursensorer ble festet til kabelen, hhv. i koblingsskjøten (i luft) mellom testobjektet og kabelen gjennom split-core-transformatoren, på ytre halvleder, og to på hvert sitt sted plassert midt i lederen. 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 den målte temperaturdifferansen ble 15 grader. Tabell A.1 viser målte og teoretiske verdier. R_{ac} ble beregnet teoretisk i et regneark med formler fra Appendix 11. Resistansen er temperaturavhengig, og i dette tilfellet ble målt ledertemperatur brukt til beregning av de teoretiske verdiene.

Tabell A.1: Tabell for sammenligning av kalkulerte og målte verdier

| Teststrøm | Målt temp. i leder [°C] | Beregnet $R_{ac}(T)$ [Ω/km] | Målt temp. på ytre halvleder [°C] | Målt temp.gradient [K/m] | Teoretisk temp.gradient [K/m] |
|-----------|-------------------------|-----------------------------|-----------------------------------|--------------------------|-------------------------------|
| 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 |

Loggingen viste at temperaturen steg raskt og stabiliserte seg etter drøyt en time med strømpåkjenning. Avkjølingen tok under to timer. Dette var utgangspunktet for valg av tidsintervall for strømsyklusen. Det ble avgjort å teste med tidsintervall på 6 timer. Figur A.1 viser hvordan temperaturen endret seg med tiden.



Figur A.1: Temperaturforløp under strømsykling.

Figur A.1 viser at tidsintervall på 6 timer gir nok tid til stabile temperaturforhold.

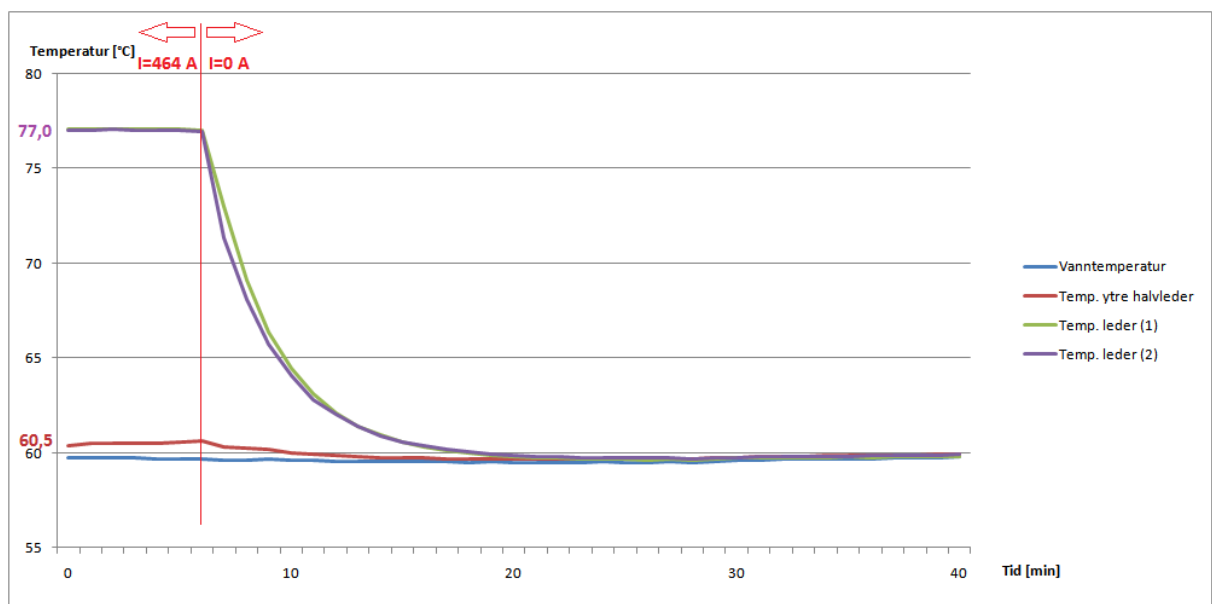
For å avgjøre hvilken strøm som i praksis gav temperaturgradient lik 15 grader ble strømverdien endret underveis i syklusen. Det er årsaken til at kurvene viser forskjellig maksimaltemperatur. Tabell A.2 viser strømverdi og korresponderende temperaturgradient. Maksimaltemperatur i leder og ved ytre halvleder er brukt til å beregne temperaturgradienten.

Tabell A.2: Målt temperaturgradient

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

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

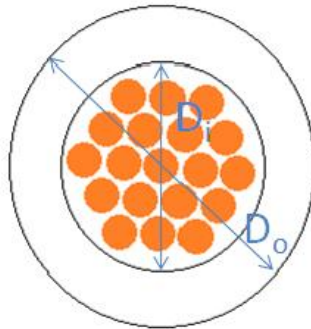
Med strøm lik 464 A og vanntemperatur lik 60 °C ble temperaturgradienten lik 16,5 grader. Figur A.2 viser målingene og temperaturverdiene til kobberlederen og ytre halvleder.



Figur A.2: Måling av tempertur med I=464 A og avkjøling (I=0 A).

Appendiks 2 - Beregning av strekk i statisk mekanisk belastede kabler

Enkle beregninger ble foretatt for å finne en omtrentlig verdi på strekket i de bøyde kablene. Det ble gjort for å avgjøre hvor mye kablene i den dynamiske testtriggen skulle strekkes. Figur A.3 viser kabeltverrsnittet med geometriske forklaringer.



Figur A.3: Kabeltverrsnitt.

Kabelens ytre diameter, $D_o=20,3$ mm.

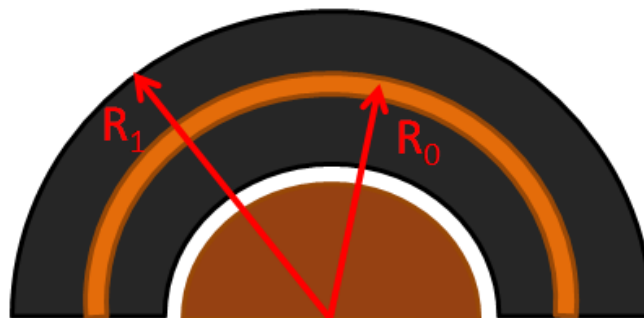
Kabelens indre diameter, $D_i=11$ mm.

Tverrsnittsarealet til isolasjonen blir dermed:

$$A = A_o - A_i = \frac{\pi}{4} (D_o^2 - D_i^2) = 228,65 \text{ mm}^2 \quad (\text{A2.1})$$

Forlengelsen av isolasjonen, ΔL , i de bøyde kablene ble beregnet som forskjellen i omkrets til det ytterste punktet på kabelen og midten av lederen, hhv. med radien R_1 og R_0 , se Figur A.4.

$$\Delta L = L_1 - L_0 = 2\pi R_1 - 2\pi R_0 \quad (\text{A2.2})$$



Figur A.4: Skisse av kabel bøyd rundt et rør sett ovenifra.

Strekket, eller strekkprosenten ble beregnet med følgende formel:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (\text{A2.3})$$

Beregnet strekkprosent for kabler med bøylediameter lik 50 mm:

$$R_1 = 25 \text{ mm} + 20,3 \text{ mm} = 45,3 \text{ mm}$$

$$R_0 = 25 \text{ mm} + 10,15 \text{ mm} = 35,15 \text{ mm}$$

Ved bruk av ligningene over gir det:

$$\varepsilon = 0,289 = 28,9 \%$$

28,9 % vurderes som veldig kraftig strekk. Kabelobjektene må belastes med 6,6 kN å strekke kabelen så mye. Denne belastningen ville trolig blitt for stor for den dynamiske testtriggen.

Beregnet strekkprosent for kabler med bøylediameter lik 300 mm:

$$R_1 = 150 \text{ mm} + 20,3 \text{ mm} = 170,3 \text{ mm}$$

$$R_0 = 150 \text{ mm} + 10,15 \text{ mm} = 160,15 \text{ mm}$$

Som gir:

$$\varepsilon = 0,063 = 6,3 \%$$

Teoretisk beregnet kraft med $\varepsilon = 0,063$:

$$F = A \cdot E \cdot \varepsilon = 228,65 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot 0,1 \cdot 10^9 \text{ Pa} \cdot 0,063 = 1,4 \text{ kN} \quad (\text{A2.4})$$

der E er elastisitetsmodulen til PEX. E ble målt til 0,1 GPa ved å strekke hele kabelen uten leder i en strekkbenk ved tilnærmet 30 °C.

Hvor mye må kabelobjektene strekkes i den dynamiske testtriggen for å strekkes 6 %?

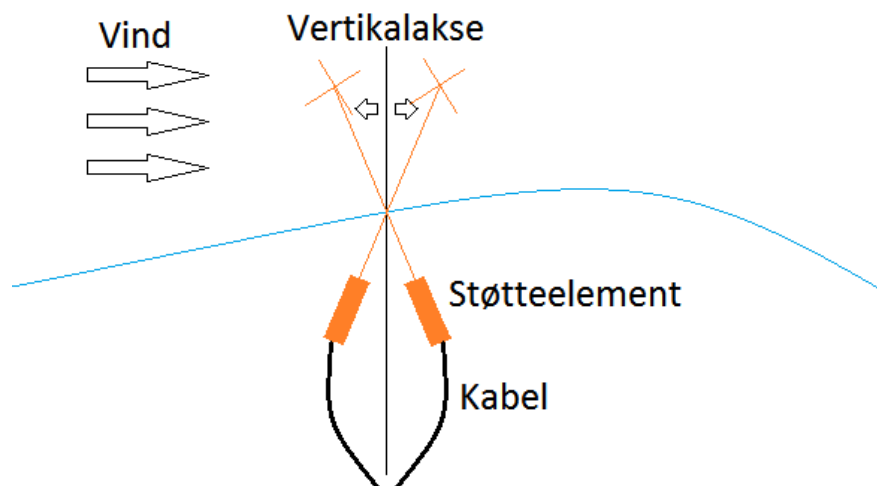
$$\Delta L = \varepsilon \cdot L_0 = 0,06 \cdot 1000 \text{ mm} = 60 \text{ mm} \quad (\text{A2.5})$$

For å oppnå en forlengelse lik 60 mm må kabelobjektene strekkes 30 mm før bevegelsen fra drivhjulet strekker kablene ytterligere 30 mm.

Appendiks 3 - Vind og bølger

Vind

På det åpne hav har vinden potensial til å nå høye hastigheter ettersom ingen vegetasjon eller landområder bremses vinden. Vindenergiene er gitt av den kinetiske energien til vinden og øker proporsjonalt med kvadratet av vindhastigheten. Det er denne energien vindturbiner omdanner til elektrisitet. En av egenskapene til vinden er at den er varierende. Kraftene i et vindkast kan forårsake at turbinen vipper om sin vertikale akse. Se Figur A.5.



Figur A.5: Vind og bølger setter kabelen i bevegelse.

Slik figuren illustrerer, vil bevegelsen til vindturbinen slenge kabelen fra side til side. Bevegelsen utsetter kabelen for horisontale krefter som for kabelisolasjonen vil være strekk- og kompresjonskrefter.

Bølger

Deler av energien fra vinden vil overføres til vannet som bølger. Så lenge bølgen ikke brytes er det ingen masseflytning av vann, kun energi som flytter seg. Bølger påvirker alle flytende objekter og setter de i bevegelse. Hvis en tar flytende vindmøller som et eksempel på et flytende objekt, vil bevegelsen fra bølgene også påvirke kabelen koblet til vindmøllen. Kabelen vil bli utsatt for krefter både i vertikal og horisontal retning. De horisontale kreftene kommer av at vindturbinen vil være i ubalanse pga. bølgebevegelsene og vippe om vertikalaksen sin, tilsvarende som for vinden. Årsaken til de vertikale kreftene er endringen i høydemeter over havbunnen. Også disse kreftene vil utsette kabelisolasjonen for strekk- og kompresjonskrefter.

Når havdypet er større enn bølgelengden gjelder følgende formel for bølgelengde L og periodetid, tiden fra en bølgetopp til neste bølgetopp, T :

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \quad (\text{A3.1})$$

Ved sterk storm kan bølgelengden bli 100 meter. En slik bølge lengde tilsvarer en periodetid på 8 sekunder. En bølge med bølgelengde på 10 meter tilsvarer en periodetid på 2,5 sekunder.

Bølgene vil etter en tid forplante seg ut av virkningsområdet til vinden. Når det skjer blir bølgene mer regelmessige og kalles for dønninger. Dønninger har lengre bølgelengde enn vindbølger, og har ofte periodetid på mer enn 10 sekunder [21].

Appendiks 4 - Bruk av ekstremalverdistatistikk

Den dielektriske holdfastheten til kabelisolasjon av PEX reduseres av vanntrevekst. Undersøkelser gjort på kabler som har havarert under drift har påvist en lineær sammenheng mellom lengden av vanntreer og reduksjon av isolasjonens dielektriske holdfasthet [28]. I kabler som har havarert under drift er det funnet lange ventilerte vanntreer som nesten har vokst gjennom isolasjonsveggen. I de havarerte kablene ble det ikke funnet sløyfetrær med samme dimensjon som de ventilerte, ettersom veksten av sløyfetrær er svært langsom. Når det kommer til vanntreer anses derfor ventilerte trær som den største bidragsyteren til kabelhavari. Analysemetoder som vil kunne estimere vanntrelengden i en bestemt kabellengde vil være verdifull og gi nyttig informasjon om kabelens tilstand.

Vanntreanalyse foretas på tynne skiver av kabelisolasjonen etter at skivene er farget. Skivene farges for å synliggjøre vanntreerne. En mye brukt metode i vanntreanalyse er å studere tettheten av vanntreer og måle lengden av alle trærne i hver skive i en bestemt lengde av isolasjonen. Å måle lengden av trærne kan være veldig tidkrevende særlig dersom tettheten av vanntreer er stor. Det er vist at man med suksess kan benytte en analysemetode med ekstremalverdistatistikk, som er en enklere og mindre tidkrevende metode samtidig som den er informativ [29].

I metoden som bruker ekstremalverdistatistikk måles kun lengden av det lengste vanntreet i hver skive. Den maksimale lengden til det største treet vil variere fra skive til skive. Verdiene blir behandlet som stokastiske variabler, og vil ved bruk av ekstremalverdistatistikk benyttes til å estimere den mest sannsynlige lengden av det lengste vanntreet i en bestemt kabellengde.

Et av kravene for at sannsynligheten skal være statistisk pålitelig er at hver prøve inneholder n trær, der $n \geq 10$. Det er også et krav at antallet prøver, N , er tilstrekkelig høyt. Med tilstrekkelig høyt menes $N \geq 5$. Så lenge disse kravene er tilfredstilt og man antar at fordelingen, $G(x)$, av vanntreerne er lik gjennom hele kabelen og at hver observasjon av det lengste treet er uavhengig av hverandre, kan sannsynligheten, $F_n(x)$, bestemmes empirisk fra målingene. Det er teoretisk bevist at dersom n øker vil $F_n(x)$ tilnærme seg en asymptotisk funksjon [29]:

$$P(l_{\max} < x) = F(x) = \exp[-\exp(-\alpha(x - u))] \quad -\infty < x < \infty \quad (\text{A4.1})$$

α er stigningstallet til fordelingen og er et mål på spredningen. Parameteren u er 36,8 % verdien til fordelingen. Variabelen, x , i fordelingen ligger mellom $-\infty$ og ∞ . Variabelen i dette tilfellet er maksimal lengden av vanntreerne, slik at x vil ligge mellom 0 og tykkelsen av isolasjonsveggen, $t_{\text{isolasjon}}$. Det viser seg derimot at når lengden av vanntreerne blir lenger enn 75 % av $t_{\text{isolasjon}}$ vil ligning (A4.1) gi avvik. Med ligning (A4.1) kan man få estimerte vanntrelengder som er lengre enn tykkelsen av isolasjonsveggen. Det finnes et

alternativ til ligning (A4.1) som setter en øvre grense for x -verdien. Hvis en logaritmisk transformasjon av variabelen x i ligning (A4.1) utføres, vil ligningen få følgende form:

$$P(l_{\max} < x) = W(x) = \exp \left[- \left(\frac{w - x}{w - v} \right)^\beta \right] \quad -\infty < x \leq w \quad (\text{A4.2})$$

β er stigningstallet til fordelingen og er et mål på spredningen. Parameteren v er 36,8 % verdien til fordelingen.

w er øvre grense for variabelen x . I dette tilfellet hvor x er vanntrelengde vil $w = t_{\text{isolasjon}}$.

På grunn av sin analogi med Weibullfordelingen av den minste verdien, kan ligning (A4.2) kalles Weibullfordelingen av den største verdien.

Ekstrapolering

Sannsynligheten for den maksimale lengden av et vanntre kan anslås i en kabellengde, L , ved bruk av den asymptotiske fordelingen. Sannsynligheten for at den maksimale vanntrelengden overstiger verdien av x er:

$$\varphi(x) = 1 - F(x)^{L/L_0} \quad (\text{A4.3})$$

Alternativt dersom Weibullfordelingen i ligning (A4.2) benyttes:

$$\varphi(x) = 1 - W(x)^{L/L_0} \quad (\text{A4.4})$$

Beregning av parametre

Selv om ligningene og forklaringen til parametrene er listet opp er det ikke like intuitivt hvordan ligningene skal brukes. Dette kapittelet viser framgangsmåten for beregning av parametrene trinn for trinn. For enklest å vise framgangsmåten benyttes et eksempel.

$$P = \frac{n_0 - 0,3}{n + 0,4} \quad (\text{A4.5})$$

I formel (A4.5) er n det totale antallet prøver og n_0 er antall prøver som har maksimal lengde mindre enn x -verdien sannsynligheten beregnes for.

L_0 er lengden av analysert kabelisolasjon. L_0 må inneholde minst fem prøver som igjen inneholder mer enn ti trær. Dersom tettheten av vanntre er stor kan L_0 reduseres. Da er det fare for at det samme vanntreet blir vurdert som det største i flere skiver. Snittet som indikerer soneinndelingen (Figur 3.51) gir oversikt over plasseringen til vanntreene i hver skive og gjør det enkelt å bedømme om to skiver inneholder samme tre. På den måten unngår man å telle samme vanntre to ganger, samtidig som kravet om uavhengige observasjoner overholdes. L_0 varierer fra kabelobjekt til kabelobjekt ettersom tettheten av

vantrær er forskjellig. Den totale lengden ble avgjort under analysen av hvert kabelobjekt slik at kravene for n og N ble tilfredsstilt. Det er ønskelig at N er så høy som mulig, ettersom det øker påliteligheten til resultatene.

Figur 1 viser et utklipp av et EXCEL-ark med verdier for en kabel aldret i 3 uker i vannbad med $T=60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($d=\infty$, $\Delta T=0$).

| Bow-tie tree | | Max length [line] | | Max length [μm] | |
|--------------|-------|-------------------|-------|------------------------------|---------|
| outer | inner | outer | inner | outer | inner |
| 16 | 14 | 6 | 4 | 93,75 | 62,5 |
| 14 | 15 | 4 | 4 | 62,5 | 62,5 |
| 17 | 21 | 6 | 6 | 93,75 | 93,75 |
| 18 | 11 | 4 | 4 | 62,5 | 62,5 |
| 14 | 17 | 7 | 7 | 109,375 | 109,375 |

Figur 1: EXCEL-ark med verdier for en kabel aldret i 3 uker med vanntemperatur, $T=60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($d=\infty$, $\Delta T=0$)

Til eksempelet brukes verdiene merket med rødefirkanter, altså bowtie-trær i strekksonen (outer).

Fem snitt av isolasjonen er analysert hvor alle snittene har mer enn ti trær ($n \geq 10$). Alle snittene kan derfor brukes som prøver ($N \geq 5$). Etter at disse kravene er tilfredsstilt er det kun verdien av l_{\max} som er interessant.

Verdien til det lengste treet i hvert snitt noteres ned, se Tabell 1.

Tabell 1: a) viser oversikt over verdiene fra Figur 1. b) viser beregning av sannsynlighet vha. formel (A4.5)

| Prøve nr. | Maksimal lengde (l_{\max}) [μm] |
|-----------|--|
| 1 | 93,8 |
| 2 | 62,5 |
| 3 | 93,8 |
| 4 | 62,5 |
| 5 | 109,4 |

a)

| x-verdi [μm] | n_0 | P |
|---------------------------|-------|--------|
| 70 | 2 | 0,3148 |
| 80 | 2 | 0,3148 |
| 90 | 2 | 0,3148 |
| 100 | 4 | 0,6852 |
| 110 | 5 | 0,8704 |

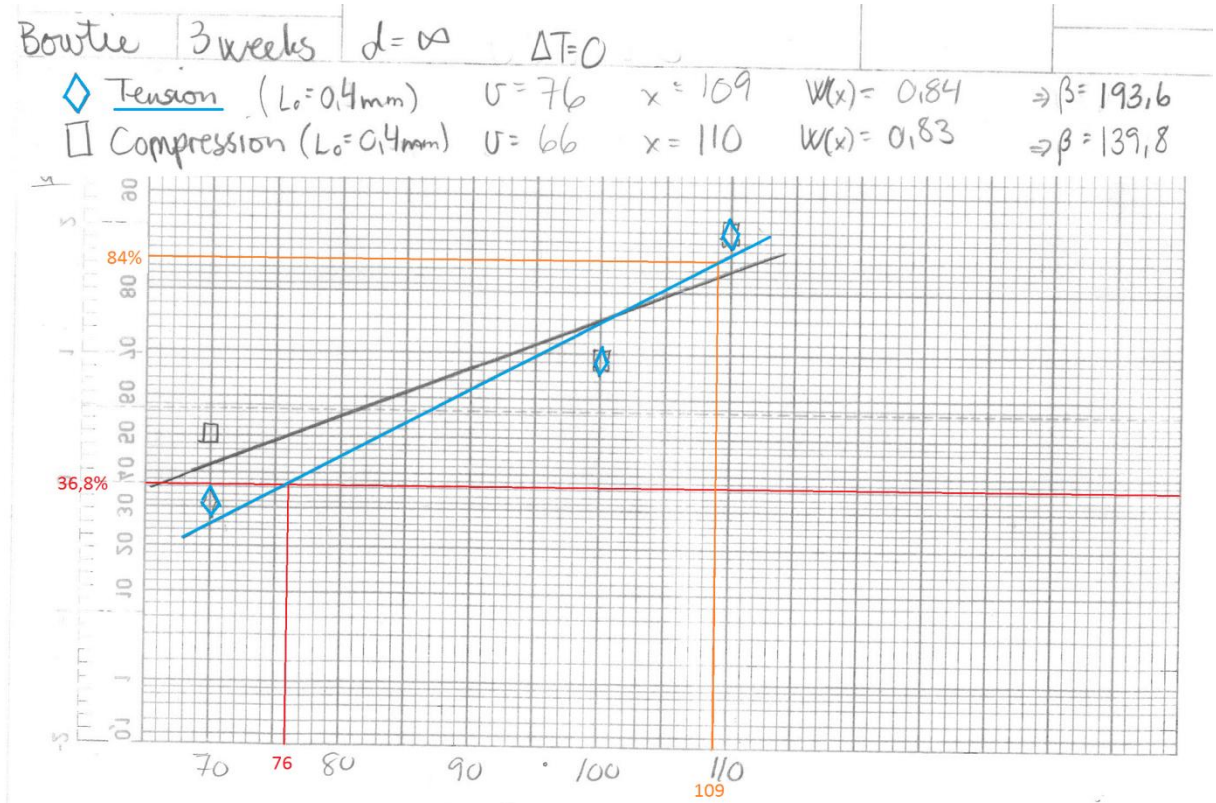
b)

Kolonnen merket "x-verdi" indikerer verdiene x-aksen skal ha på ekstremalverdipapiret. Intervallet må tilpasses verdiene til prøvene. I dette eksempelet ble intervallet 10 enheter.

Deretter kan kolonnen under n_0 fylles ut. l_{\max} -verdien sammenlignes med x-verdien. n_0 er verdien til antallet prøver hvor $l_{\max} < x$. Tabell 1 viser at opp til 90 er det kun to prøver hvor $l_{\max} < x$, prøve 2 og 4. Når $x=100$ må prøve 1 og prøve 3 legges til, n_0 blir dermed 4. Når x når 110 vil $l_{\max} < x$ i alle fem prøvene.

Ligning (A4.5) brukes til å beregne sannsynligheten, P.

Verdiene for x og P fra Tabell 1b) plottes på et ekstremalverdipapir. Figur 2 viser plottet for dette eksempelet. Strekksonen er merket med blått. En trendlinje trekkes mellom punktene.



Figur 2: Grafisk fremstilling av verdiene i tabell 1b) på et ekstremalverdipapir

Verdien til v kan leses av der linjen til plottet krysser 36,8%-linjen. Punktet hvor v leses av merket med rødt og har verdien 76. I ligning (A4.2) er det nå tre ukjente variabler $W(x)$, x og β . Ved å velge et tilfeldig punkt langs den blå linjen, finner man en verdi for $W(x)$ og tilhørende x-verdi. På figuren er punktet merket med oransje streker og gir verdiene $W(x)=0,84$ og $x=109$.

β er den siste ukjente verdien i ligning (A4.2), og når ligningen løses for β , får man denne ligningen:

$$\beta = \frac{\ln(-\ln(W(x)))}{\ln\left(\frac{w-x}{w-v}\right)} \tag{A4.6}$$

$\beta=193,6$ i dette eksempelet. Ligning (A4.2) er komplett og kun x er variabel, slik den skal være.

Verdien til φ er valgt til 0,95, 0,5 og 0,05 til utregningen av x-verdiene til de respektive verdiene til φ i tabell 2.

Ligning $\varphi(x)$ løses med hensyn på $W(x)$:

$$W(x) = (1 - \varphi)^{L_0/L} \quad (\text{A4.7})$$

$W(x)$ løses med hensyn på x :

$$x = w - (w - v)(-\ln(W(x)))^{1/\beta} \quad (\text{A4.8})$$

Tabell 2: Parametre fra ligning (A4.2) beregnet fra sannsynlighetsfordelingen og korresponderende 95 %, 50 % og 5 % sannsynlighet for at den maksimale vanntrelengden i en 1 m lang kabel overstiger den gitte verdien av l_{\max} . (Verdiene til eksempelet er merket med rødt.)

| Bowtie $\Delta T=0$ | | Strekksone | | | | | Kompresjonssone | | | | |
|---------------------|---------------------|---------------------|---------|--|-----|-----|---------------------|---------|--|-----|-----|
| Bøye-diameter [mm] | Aldrings-tid [uker] | v [μm] | β | l_{\max} [μm] i en 1 m lang kabel | | | v [μm] | β | l_{\max} [μm] i en 1 m lang kabel | | |
| | | | | 95% | 50% | 5% | | | 95% | 50% | 5% |
| 50 | 3 | 75 | 79,2 | 350 | 410 | 520 | 70 | 164,5 | 200 | 230 | 290 |
| | 6 | 117 | 107,3 | 340 | 380 | 470 | 103 | 265,3 | 190 | 210 | 250 |
| | 9 | 110 | 38,6 | 640 | 750 | 950 | 95 | 77,2 | 370 | 430 | 540 |
| ∞ | 3 | 76 | 193,6 | 200 | 230 | 280 | 66 | 139,8 | 240 | 280 | 340 |
| | 6 | 89 | 342,7 | 160 | 180 | 200 | 75 | 130,7 | 260 | 300 | 370 |
| | 9 | 85 | 99,2 | 330 | 380 | 460 | 75 | 192,8 | 200 | 230 | 280 |

Appendiks 5 - Resultater fra statisk mekanisk belastning av kabler med $T=30\text{ }^{\circ}\text{C}$

Tabeller med resultater fra eksperimenter med statisk mekanisk belastning av kabler med vanntemperatur lik $30\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Tabell A.3: Observert forekomst og gjennomsnittlig maksimal lengde av ventilerte trær ved indre halvleder i kabler aldret med $T=30\text{ }^{\circ}\text{C}$ og $\Delta T=0$.

| Bøylediameter [mm] | Aldringstid [uker] | Forekomst og gjennomsnittlig maksimal lengde av ventilerte trær ved indre halvleder | | | |
|-----------------------|-----------------------|---|---------------------------------------|------------------------|---------------------------------------|
| | | Strekk | | Kompresjon | |
| | | n [cm^{-1}] | $l_{\text{av,max}}$ [μm] | n [cm^{-1}] | $l_{\text{av,max}}$ [μm] |
| 50 | 3 | 2,0 | 218,6 | 1,1 | 166,7 |
| ∞ | 3 | 2,0 | 136,4 | 1,4 | 118,2 |

Tabell A.4: Observert forekomst og gjennomsnittlig maksimal lengde av ventilerte trær ved indre halvleder i kabler aldret med $T=30\text{ }^{\circ}\text{C}$ og $\Delta T=15\text{ K}$.

| Bøylediameter [mm] | Aldringstid [uker] | Forekomst og gjennomsnittlig maksimal lengde av ventilerte trær ved indre halvleder | | | |
|-----------------------|-----------------------|---|---------------------------------------|------------------------|---------------------------------------|
| | | Strekk | | Kompresjon | |
| | | n [cm^{-1}] | $l_{\text{av,max}}$ [μm] | n [cm^{-1}] | $l_{\text{av,max}}$ [μm] |
| 50 | 3 | 5,6 | 191,3 | 0,6 | 178,0 |
| ∞ | 3 | 5,9 | 157,7 | 6,9 | 176,9 |

Tabell A.5: Observert forekomst og gjennomsnittlig maksimal lengde av ventilerte trær ved ytre halvleder i kabler aldret med $T=30\text{ }^{\circ}\text{C}$ og $\Delta T=0$.

| Bøylediameter [mm] | Aldringstid [uker] | Forekomst og gjennomsnittlig maksimal lengde av ventilerte trær ved ytre halvleder | | | |
|-----------------------|-----------------------|--|---------------------------------------|------------------------|---------------------------------------|
| | | Strekk | | Kompresjon | |
| | | n [cm^{-1}] | $l_{\text{av,max}}$ [μm] | n [cm^{-1}] | $l_{\text{av,max}}$ [μm] |
| 50 | 3 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| ∞ | 3 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |

Tabell A.6: Observert forekomst og gjennomsnittlig maksimal lengde av ventilerte trær ved ytre halvleder i kabler aldret med $T=30\text{ }^{\circ}\text{C}$ og $\Delta T=15\text{ K}$.

| Bøylediameter [mm] | Aldringstid [uker] | Forekomst og gjennomsnittlig maksimal lengde av ventilerte trær ved ytre halvleder | | | |
|-----------------------|-----------------------|--|---------------------------------------|------------------------|---------------------------------------|
| | | Strekk | | Kompresjon | |
| | | n [cm^{-1}] | $l_{\text{av,max}}$ [μm] | n [cm^{-1}] | $l_{\text{av,max}}$ [μm] |
| 50 | 3 | 0,5 | 56,8 | 0,4 | 85,86 |
| ∞ | 3 | 0,1 | 197,0 | 0,2 | 113,6 |

Tabell A.7: Observert forekomst og gjennomsnittlig maksimal lengde av bowtie-trær i kabler aldret med $T=30\text{ }^{\circ}\text{C}$ og $\Delta T=0$.

| Bøylediameter [mm] | Aldringstid [uker] | Forekomst og gjennomsnittlig maksimal lengde av bowtie-trær | | | |
|-----------------------|-----------------------|---|---------------------------------------|------------------------|---------------------------------------|
| | | Strekk | | Kompresjon | |
| | | n [cm^{-1}] | $l_{\text{av,max}}$ [μm] | n [cm^{-1}] | $l_{\text{av,max}}$ [μm] |
| 50 | 3 | 84,8 | 109,7 | 41,0 | 71,8 |
| ∞ | 3 | 52,1 | 69,1 | 67,9 | 74,1 |

Tabell A.8: Observert forekomst og gjennomsnittlig maksimal lengde av bowtie-trær i kabler aldret med $T=30\text{ }^{\circ}\text{C}$ og $\Delta T=15\text{ K}$.

| Bøylediameter [mm] | Aldringstid [uker] | Forekomst og gjennomsnittlig maksimal lengde av bowtie-trær | | | |
|-----------------------|-----------------------|---|---------------------------------------|------------------------|---------------------------------------|
| | | Strekk | | Kompresjon | |
| | | n [cm^{-1}] | $l_{\text{av,max}}$ [μm] | n [cm^{-1}] | $l_{\text{av,max}}$ [μm] |
| 50 | 3 | 187,6 | 199,0 | 152,4 | 140,2 |
| ∞ | 3 | 221,4 | 145,5 | 197,1 | 122,7 |

Tabell A.9: Observert forekomst og gjennomsnittlig maksimal lengde av bowtie-trær i kabler aldret med $T=30\text{ }^{\circ}\text{C}$ og $\Delta T=0$.

| Bøylediameter [mm] | Aldringstid [uker] | Forekomst og gjennomsnittlig maksimal lengde av bowtie-trær | | | |
|-----------------------|-----------------------|---|---------------------------------------|------------------------|---------------------------------------|
| | | Strekk | | Kompresjon | |
| | | n [cm^{-1}] | $l_{\text{av,max}}$ [μm] | n [cm^{-1}] | $l_{\text{av,max}}$ [μm] |
| 50 | 3 | 84,8 | 109,7 | 41,0 | 71,8 |
| | 28 | 121,7 | 111,1 | 90,8 | 98,7 |
| 300 | 3 | 293,3 | 103,1 | 220,0 | 78,1 |
| | 28 | 86,7 | 112,5 | 41,7 | 109,0 |
| ∞ | 3 | 52,1 | 69,1 | 67,9 | 74,0 |

Kommentar til Tabell A.9: Analysen av kabelen med bøylediameter lik 300 mm aldret i 3 uker er gjennomført med bruk av olje. Deteksjonsgrensen kan derfor være forskjellig og kan forklare forskjellen i forekomsten av bowtie-trærne.

Appendiks 6 - Resultater fra statisk mekanisk belastning av kabler med T=60 °C
 Tabeller med resultater fra forsøk med statisk mekanisk belastning av kabler med vanntemperatur lik 60 °C.

Tabell A.10: Observert forekomst og gjennomsnittlig maksimal lengde av ventilerte trær ved indre halvleder i kabler aldret med T=60 °C og $\Delta T=0$.

| Bøylediameter [mm] | Aldringstid [uker] | Forekomst og gjennomsnittlig maksimal lengde av ventilerte trær ved indre halvleder | | | |
|-----------------------|-----------------------|---|--------------------------|-----------------------|--------------------------|
| | | Strekk | | Kompresjon | |
| | | n [cm ⁻¹] | l _{av,max} [µm] | n [cm ⁻¹] | l _{av,max} [µm] |
| 50 | 3 | 2,3 | 171,9 | 0,0 | 0,0 |
| | 6 | 1,3 | 103,1 | 0,5 | 125,0 |
| | 9 | 0,3 | 156,3 | 0,3 | 125,0 |
| ∞ | 3 | 1,9 | 142,9 | 0,5 | 132,8 |
| | 6 | 1,5 | 109,4 | 0,8 | 140,6 |
| | 9 | 0,5 | 93,8 | 0,5 | 85,9 |

Tabell A.11: Observert forekomst og gjennomsnittlig maksimal lengde av ventilerte trær ved indre halvleder i kabler aldret med T=60 °C og $\Delta T=16,5$ K.

| Bøylediameter [mm] | Aldringstid [uker] | Forekomst og gjennomsnittlig maksimal lengde av ventilerte trær ved indre halvleder | | | |
|-----------------------|-----------------------|---|--------------------------|-----------------------|--------------------------|
| | | Strekk | | Kompresjon | |
| | | n [cm ⁻¹] | l _{av,max} [µm] | n [cm ⁻¹] | l _{av,max} [µm] |
| 50 | 3 | 1,4 | 209,4 | 0,8 | 153,6 |
| | 6 | 5,9 | 632,4 | 1,1 | 316,4 |
| | 9 | 5,9 | 934,2 | 0,8 | 531,3 |
| ∞ | 3 | 2,5 | 250,0 | 5,0 | 231,4 |
| | 6 | 9,0 | 1197,2 | 9,1 | 1476,1 |
| | 9 | 10,6 | 881,9 | 9,6 | 1636,9 |

Tabell A.12: Observert forekomst og gjennomsnittlig maksimal lengde av ventilerte trær ved ytre halvleder i kabler aldret med T=60 °C og $\Delta T=0$.

| Bøylediameter [mm] | Aldringstid [uker] | Forekomst og gjennomsnittlig maksimal lengde av ventilerte trær ved ytre halvleder | | | |
|-----------------------|-----------------------|--|--------------------------|-----------------------|--------------------------|
| | | Strekk | | Kompresjon | |
| | | n [cm ⁻¹] | l _{av,max} [µm] | n [cm ⁻¹] | l _{av,max} [µm] |
| 50 | 3 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| | 6 | 0,3 | 250,0 | 0,0 | 0,0 |
| | 9 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| ∞ | 3 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| | 6 | 0,0 | 0,0 | 0,3 | 171,9 |
| | 9 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |

Tabell A.13: Observert forekomst og gjennomsnittlig maksimal lengde av ventilerte trær ved ytre halvleder i kabler aldre med $T=60\text{ }^{\circ}\text{C}$ og $\Delta T=16,5\text{ K}$.

| Bøylediameter [mm] | Aldringstid [uker] | Forekomst og gjennomsnittlig maksimal lengde av ventilerte trær ved ytre halvleder | | | |
|-----------------------|-----------------------|--|---------------------------------------|------------------------|---------------------------------------|
| | | Strekk | | Kompresjon | |
| | | n [cm^{-1}] | $l_{\text{av,max}}$ [μm] | n [cm^{-1}] | $l_{\text{av,max}}$ [μm] |
| 50 | 3 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| | 6 | 0,2 | 226,6 | 0,0 | 0,0 |
| | 9 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| ∞ | 3 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| | 6 | 0,0 | 0,0 | 0,1 | 140,6 |
| | 9 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |

Tabell A.14: Observert forekomst og gjennomsnittlig maksimal lengde av bowtie-trær i kabler aldre med $T=60\text{ }^{\circ}\text{C}$ og $\Delta T=0$.

| Bøylediameter [mm] | Aldringstid [uker] | Forekomst og gjennomsnittlig maksimal lengde av bowtie-trær | | | |
|-----------------------|-----------------------|---|---------------------------------------|------------------------|---------------------------------------|
| | | Strekk | | Kompresjon | |
| | | n [cm^{-1}] | $l_{\text{av,max}}$ [μm] | n [cm^{-1}] | $l_{\text{av,max}}$ [μm] |
| 50 | 3 | 255,0 | 78,1 | 200,0 | 70,3 |
| | 6 | 720,0 | 121,9 | 450,0 | 109,4 |
| | 9 | 490,0 | 145,3 | 232,5 | 101,6 |
| ∞ | 3 | 395,0 | 84,4 | 390,0 | 78,1 |
| | 6 | 675,0 | 93,8 | 545,0 | 100,0 |
| | 9 | 395,0 | 103,1 | 335,0 | 81,3 |

Tabell A.15: Observert forekomst og gjennomsnittlig maksimal lengde av bowtie-trær ved indre halvleder i kabler aldre med $T=60\text{ }^{\circ}\text{C}$ og $\Delta T=16,5\text{ K}$.

| Bøylediameter [mm] | Aldringstid [uker] | Forekomst og gjennomsnittlig maksimal lengde av bowtie-trær | | | |
|-----------------------|-----------------------|---|---------------------------------------|------------------------|---------------------------------------|
| | | Strekk | | Kompresjon | |
| | | n [mm^{-3}] | $l_{\text{av,max}}$ [μm] | n [mm^{-3}] | $l_{\text{av,max}}$ [μm] |
| 50 | 3 | 206,0 | 453,1 | 170,8 | 379,7 |
| | 6 | 186,0 | 462,5 | 179,5 | 400,0 |
| | 9 | 144,0 | 503,1 | 141,5 | 737,5 |
| ∞ | 3 | 116,3 | 584,4 | 113,5 | 418,8 |
| | 6 | 189,0 | 658,0 | 184,5 | 704,7 |
| | 9 | 141,3 | 668,8 | 140,8 | 651,6 |

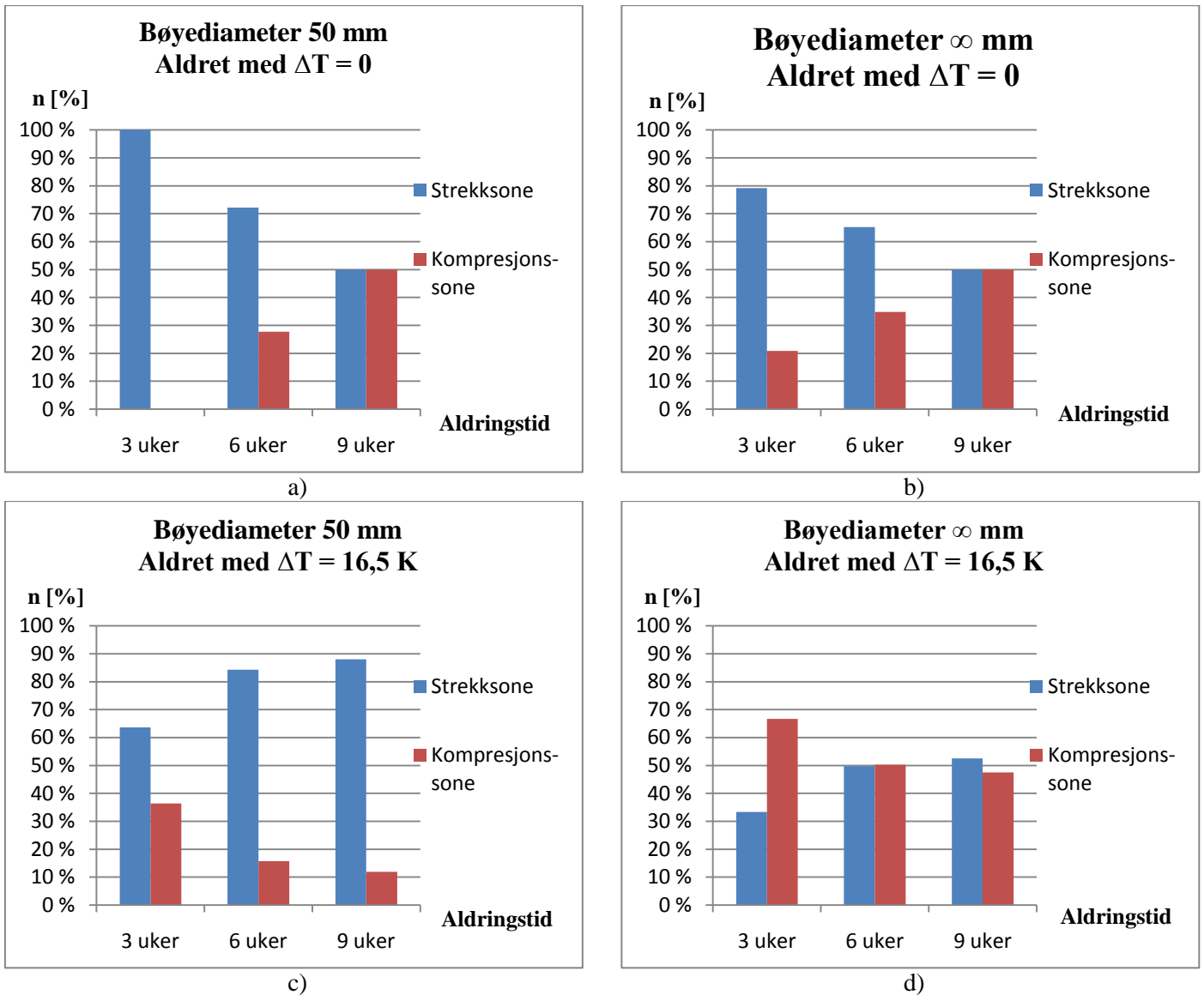
Appendiks 7 - Resultater fra dynamisk mekanisk belastning av kabler

Tabeller med resultater fra forsøk med dynamisk mekanisk belastning av kabler med vanntemperatur lik 30 °C.

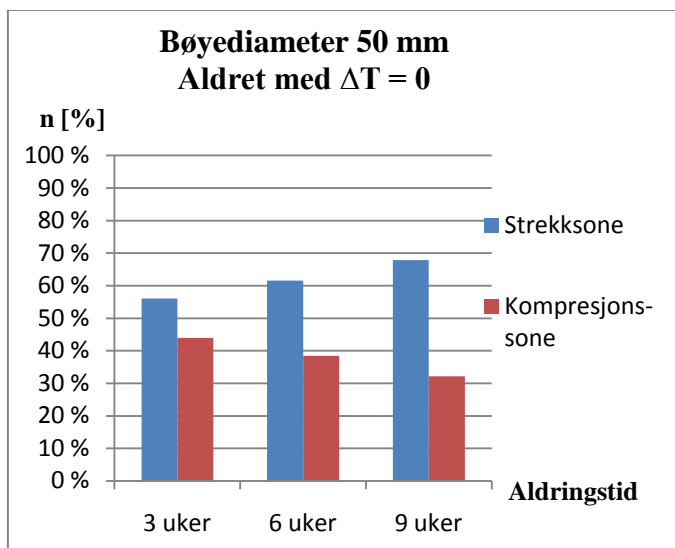
Tabell A.16: Oversikt av forekomst og gjennomsnittlig maksimal lengde av vanntrær i kabelobjekter aldret 3 uker med statisk mekanisk og dynamisk mekanisk belastning.

| Kabelobjekt | Forekomst og gjennomsnittlig maksimal lengde av vanntrær | | | | | |
|--|--|--------------------------|------------------------------------|--------------------------|-----------------------|--------------------------|
| | Ventilerte trær ved indre halvleder | | Ventilerte trær ved ytre halvleder | | Bowtie-trær | |
| | n [cm ⁻¹] | l _{av,max} [µm] | n [cm ⁻¹] | l _{av,max} [µm] | n [cm ⁻¹] | l _{av,max} [µm] |
| ε=0 %, f=0 Hz Referanse | 0,4 | 132,8 | 0,0 | 0,0 | 405,0 | 118,8 |
| ε=6 %, f=0 Hz Statisk | 1,5 | 174,5 | 0,0 | 0,0 | 570,0 | 121,9 |
| ε=6 %, f=0,1 Hz Dynamisk (M2) | 4,1 | 180,2 | 1,4 | 109,4 | 880,0 | 121,9 |
| ε=6 %, f=1 Hz Dynamisk (M1) | 1,7 | 210,9 | 0,0 | 0,0 | 835,0 | 96,9 |

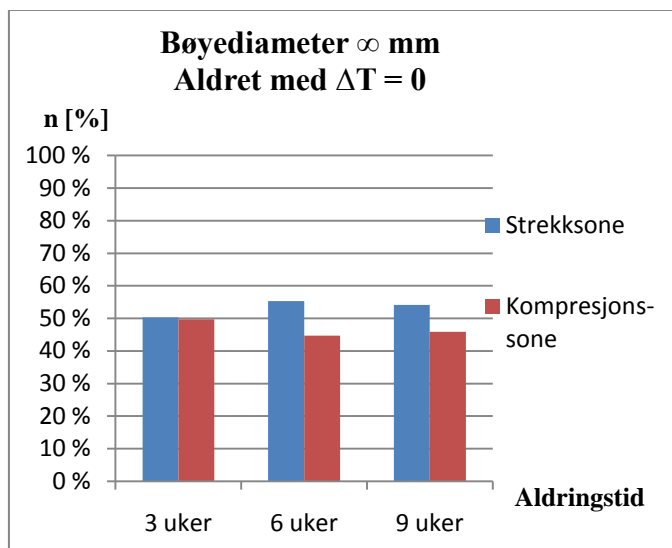
Appendiks 8 - Sammenligning av forekomst av vanntrær per cm isolasjon i strekk- og kompresjonsone



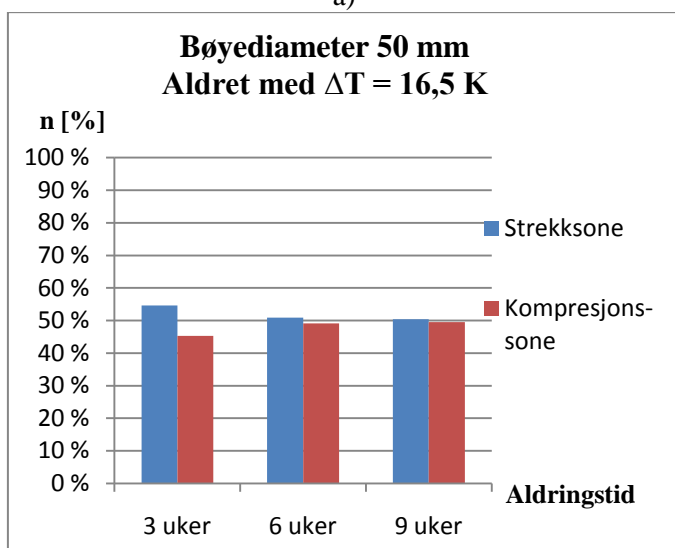
Figur A.6: Prosentvis forekomst av ventilerte trær ved indre halvleder i strekk- og kompresjonsone. Kablene er aldret i 3, 6 og 9 uker med $T=60$ °C.



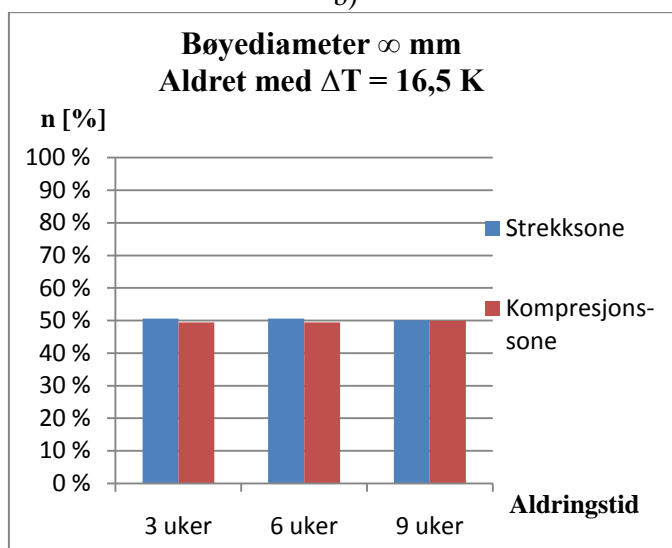
a)



b)



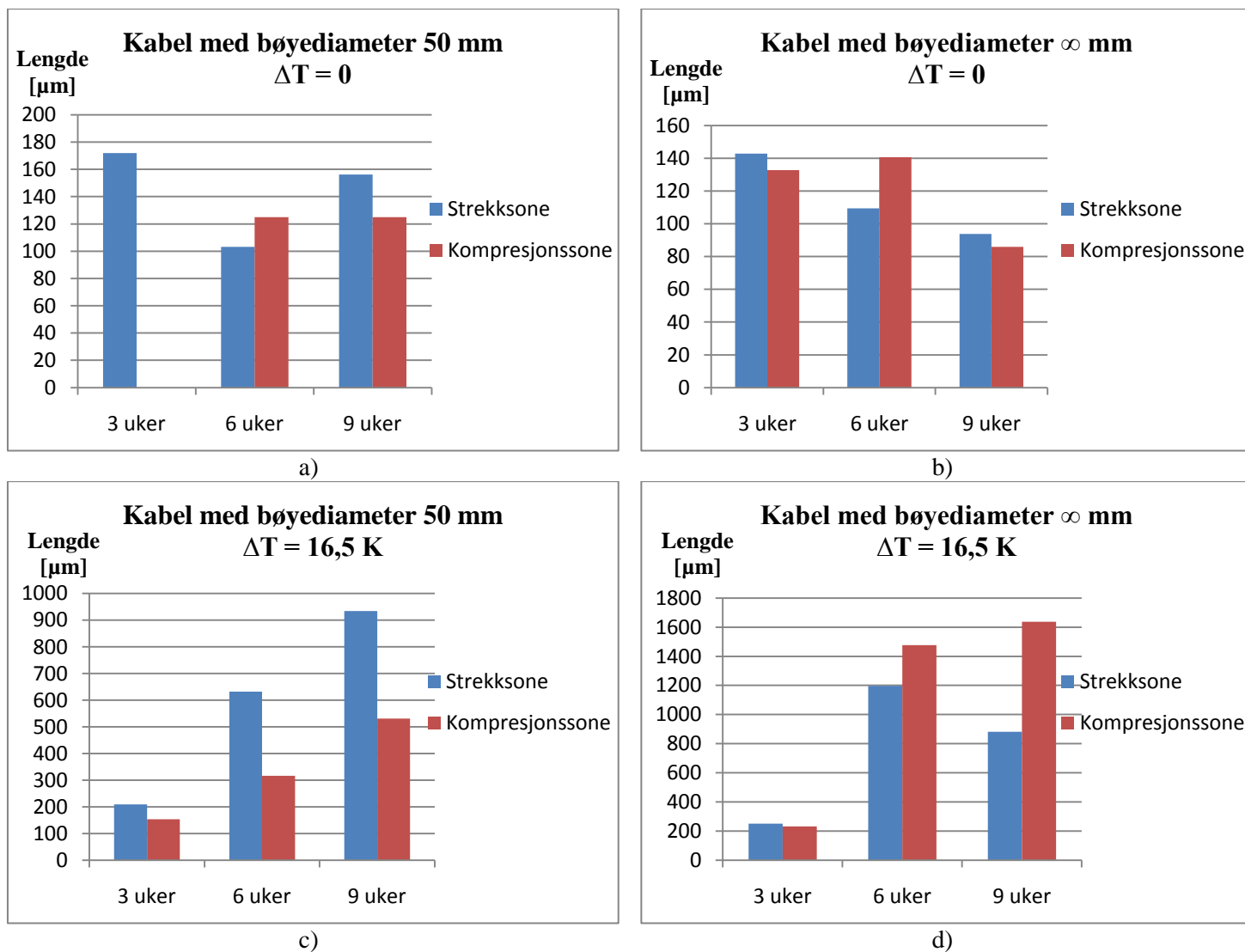
c)



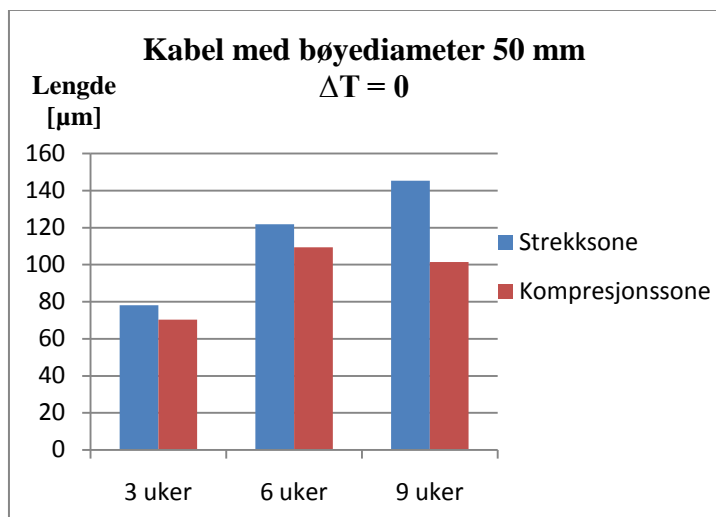
d)

Figur A.7: Prosentvis forekomst av bowtie-trær i strekk- og kompresjonsone. Kablene er aldret i 3, 6 og 9 uker med $T=60$ °C.

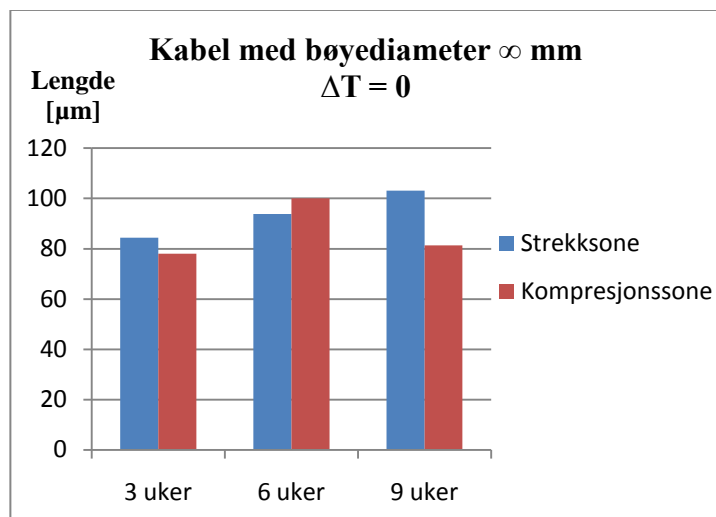
Appendiks 9 - Sammenligning av gjennomsnittlig maksimal lengde i strekk- og kompresjonssone



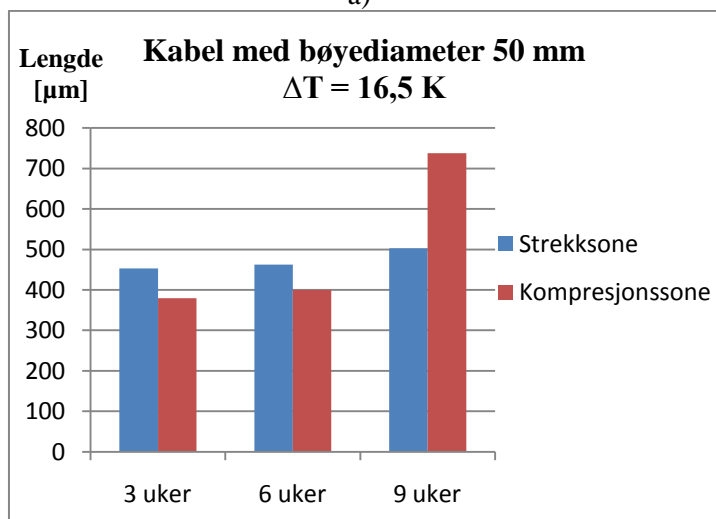
Figur A.8: Gjennomsnittlig maksimal lengde av ventilerte trær ved indre halvleder i strekk- og kompresjonssone.



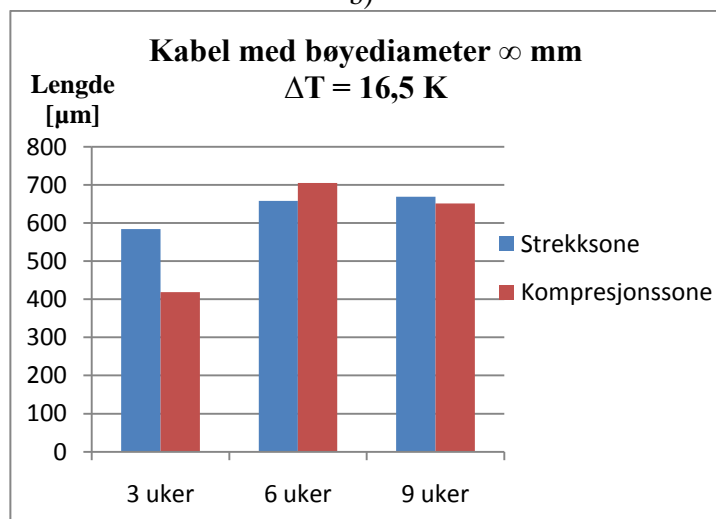
a)



b)

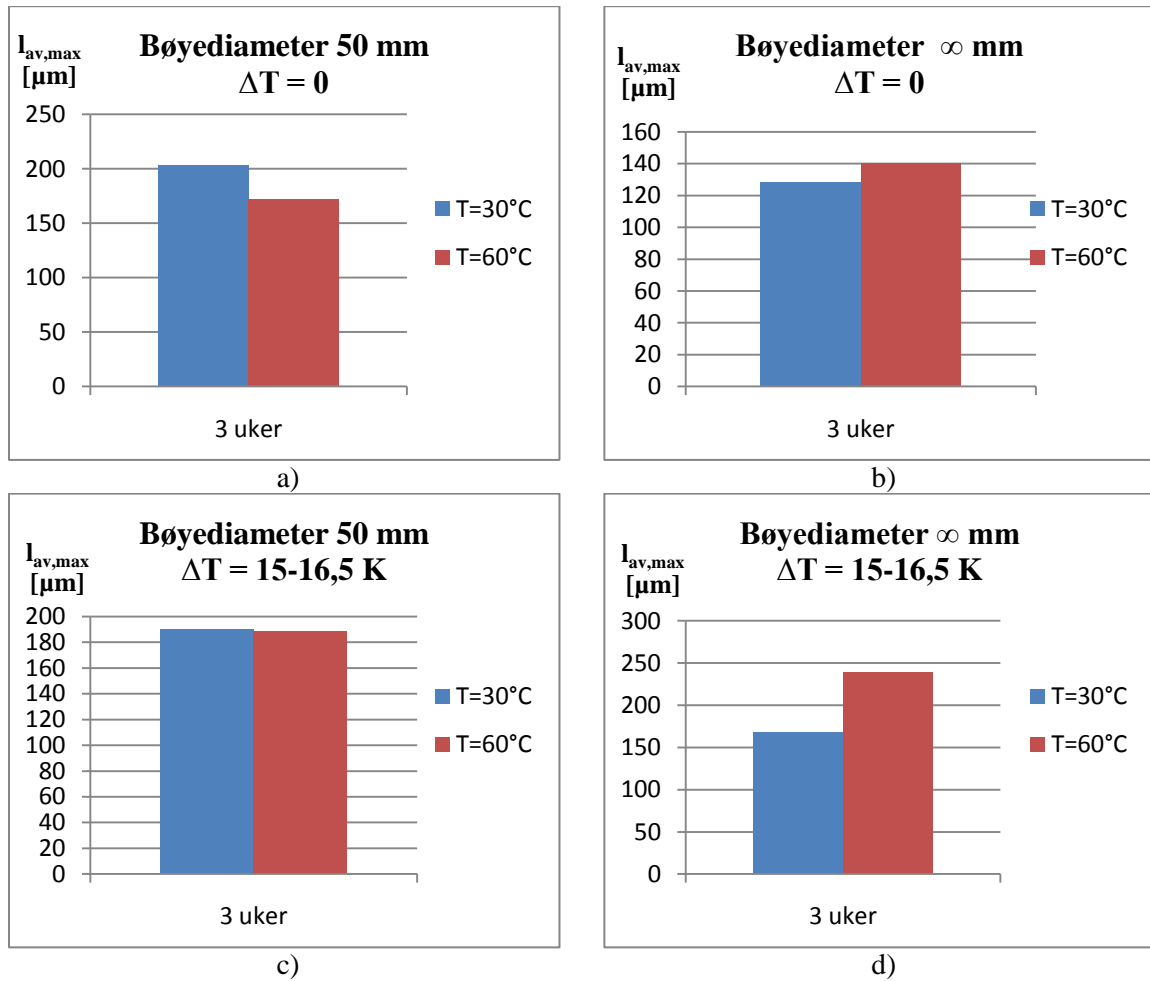


c)

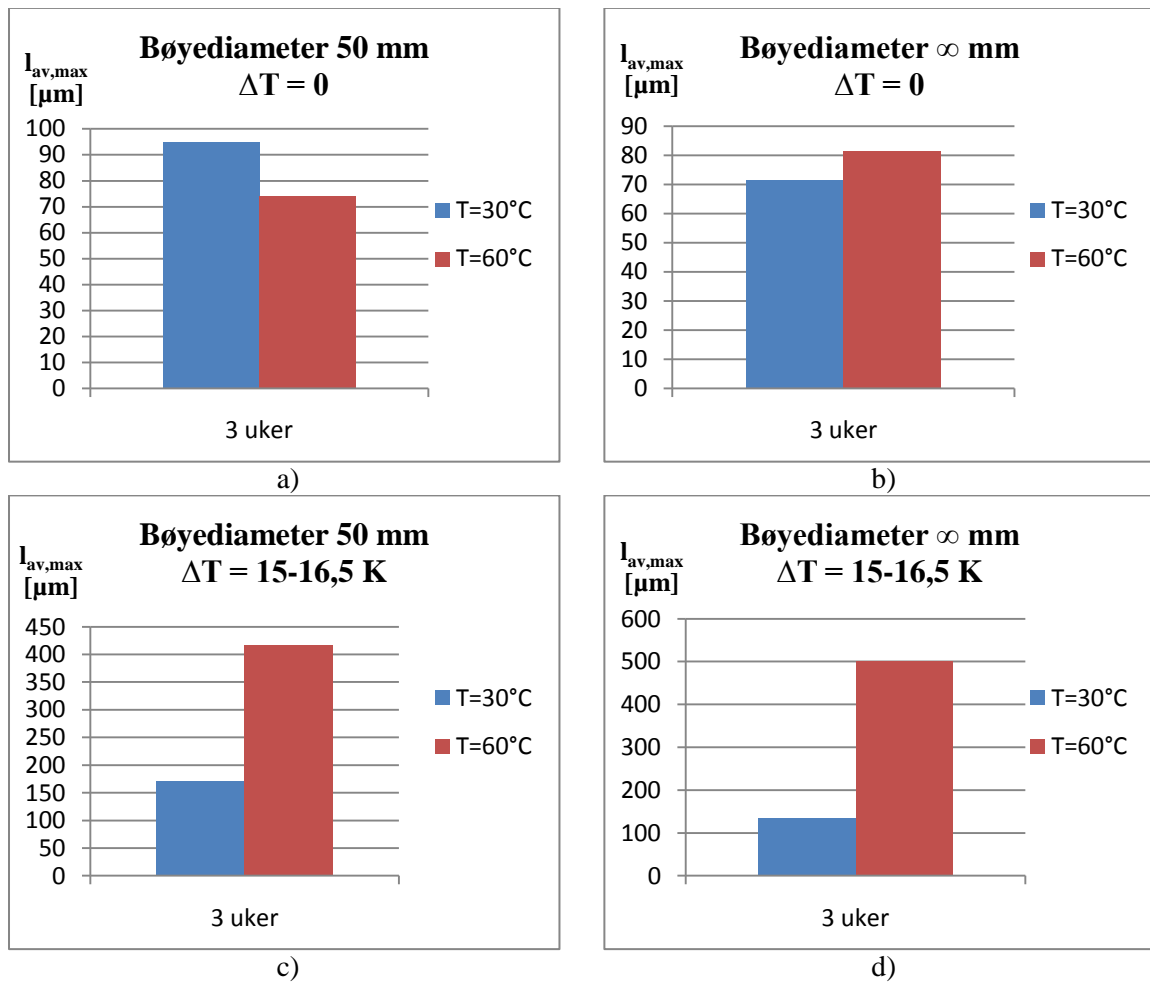


Figur A.9: Gjennomsnittlig maksimal lengde av bowtie-trær i strekk- og kompresjonssone.

Appendiks 10 - Sammenligning av gjennomsnittlig maksimal lengde i kabler aldret med forskjellig temperatur



Figur A.10: Sammenligning av gjennomsnittlig maksimal lengde av ventilerte trær ved indre halvleder fra kabler aldret med $T=30^\circ\text{C}$ og 60°C .



Figur A.11: Sammenligning av gjennomsnittlig maksimal lengde av bowtie-trær fra kabler aldret med T=30 °C og 60°C.

Appendiks 11 - Electric cables – Calculation of the current rating (IEC-standard) *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):

$$R = R'(1 + y_s + y_p) \quad (\text{A11.1})$$

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:

$$R' = R_0 [1 + \alpha_{20} (\theta - 20)] \quad (\text{A11.2})$$

where

R_0 is the d.c. resistance of the conductor at 20 °C (Ω/m);

The value of R_0 shall be derived directly from IEC 60228. Where the conductor size is outside the range covered by IEC 60228, the value of R_0 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:

$$y_s = \frac{x_s^4}{192 + 0,8x_s^4} \quad (\text{A11.3})$$

where

$$x_s^2 = \frac{8\pi f}{R'} 10^{-7} k_s \quad (\text{A11.4})$$

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) <i>Conductors</i> | | |
| Copper | 1,724 1 10 ⁻⁸ | 3,93 10 ⁻³ |
| Aluminium | 2,826 4 10 ⁻⁸ | 4,03 10 ⁻³ |
| b) <i>Sheaths and armour</i> | | |
| 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**

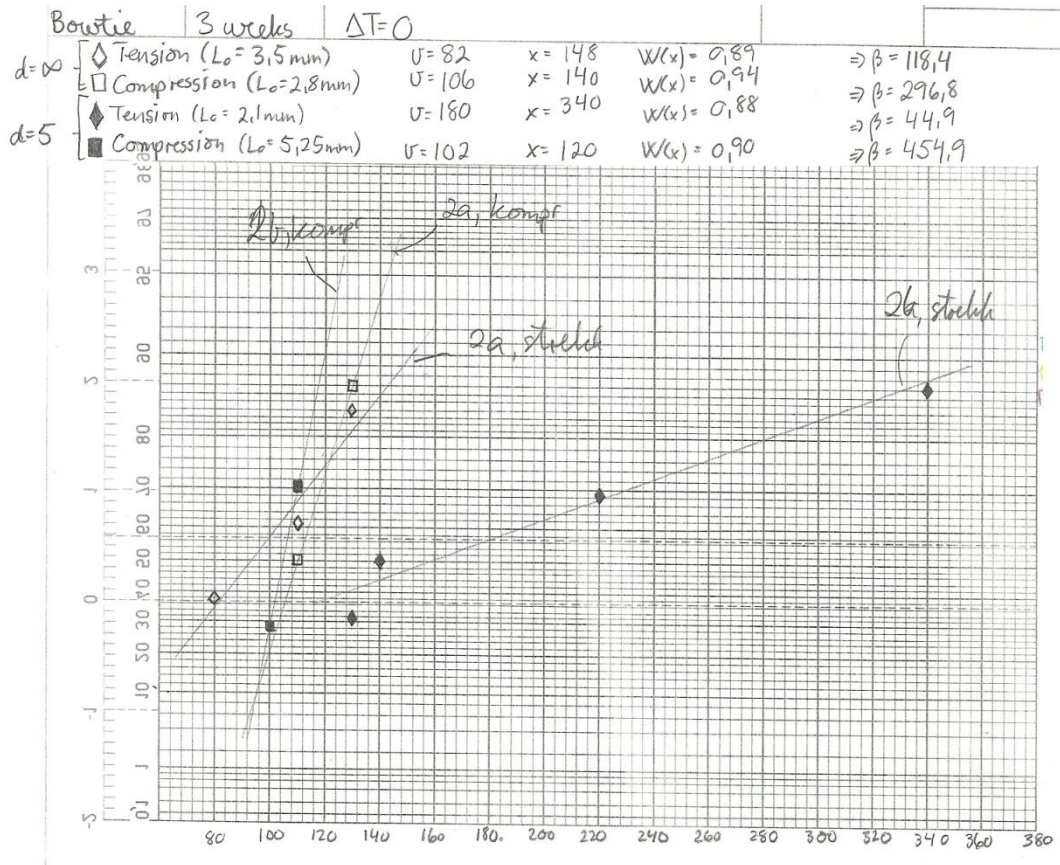
| Type of conductor | Whether dried and impregnated or not | k_s | k_p |
|-----------------------------------|---|-------|-------|
| <i>Copper</i> | | | |
| Round, stranded | Yes | 1 | 0,8 |
| Round, stranded | No | 1 | 1 |
| Round, segmental ^a | | 0,435 | 0,37 |
| Hollow, helical stranded | Yes | b | 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 | |

Appendiks 12 - Plott av sannsynlighetsfordeling på ekstremalverdipapir

Statisk mekanisk belastede kabler, $T=30\text{ }^{\circ}\text{C}$

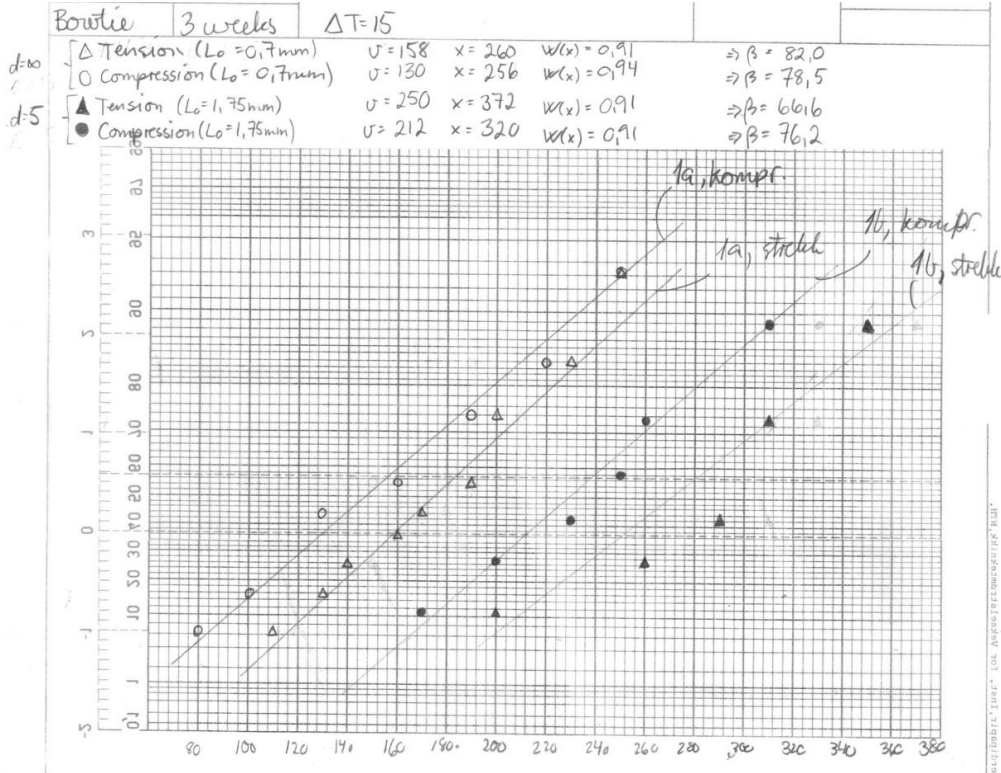
Plott av verdier fra sannsynlighetsberegning på ekstremalverdipapir fra eksperimentet med statisk mekanisk belastede kabler aldret i 3 uker med $T=30\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Bowtie, $\Delta T=0$:



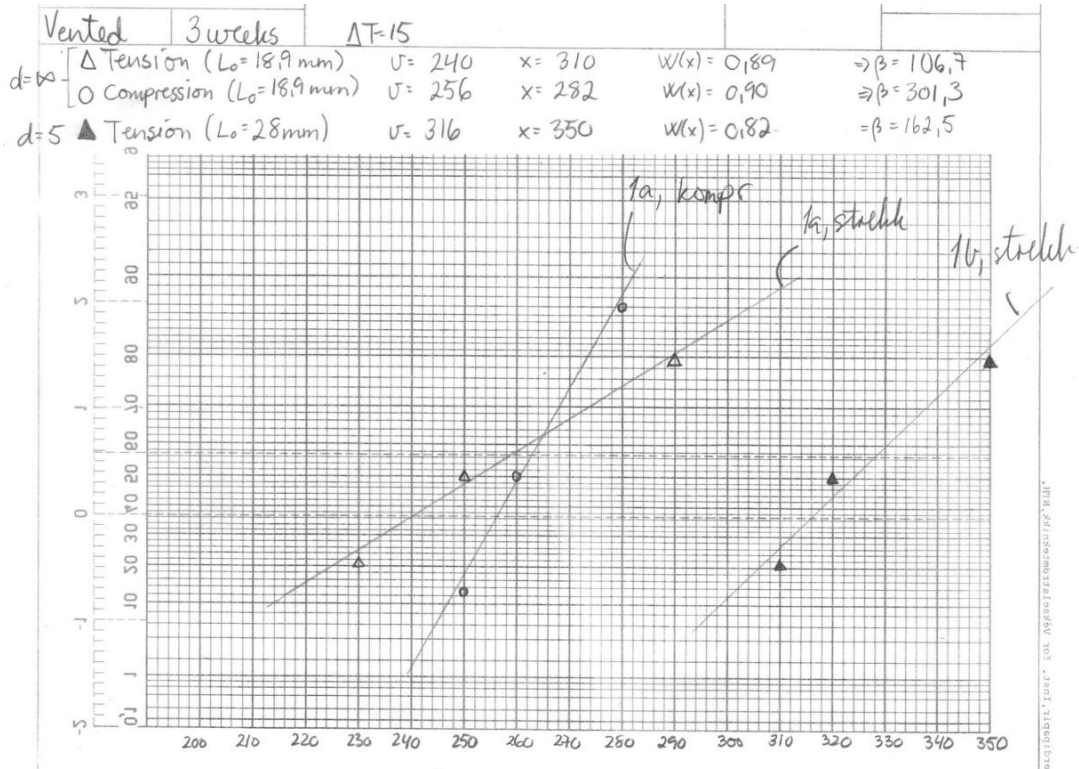
Figur A.12: Kumulativ sannsynlighetsfordeling av maksimal lengde av bowtie-trær per snitt (L_0) i bøyd og rett kabel aldret i 3 uker ($\Delta T=0$).

Bowtie, $\Delta T=15$ K:



Figur A.13: Kumulativ sannsynlighetsfordeling av maksimal lengde av bowtie-trær per snitt (L_0) i bøyd og rett kabel aldret i 3 uker ($\Delta T=15$).

Ventilerte trær, $\Delta T=15$ K:



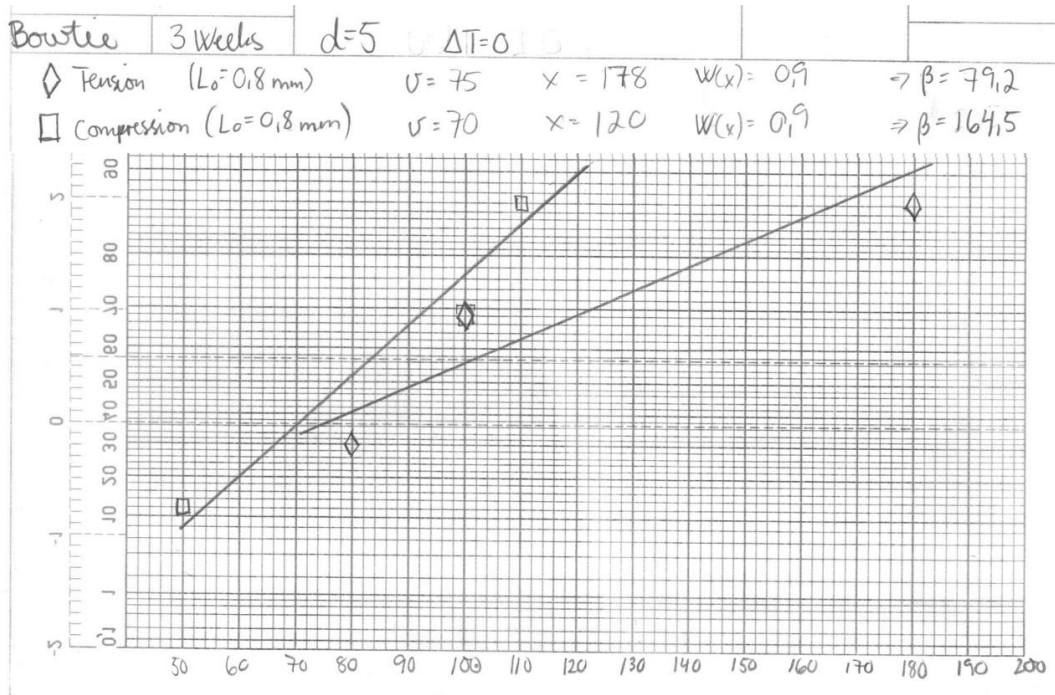
Figur A.14: Kumulativ sannsynlighetsfordeling av maksimal lengde av ventilerte trær ved indre halvleder per snitt (L_0) i bøyd og rett kabel aldret i 3 uker ($\Delta T=15$).

Appendiks 13 - Plott av sannsynlighetsfordeling på ekstremalverdipapir

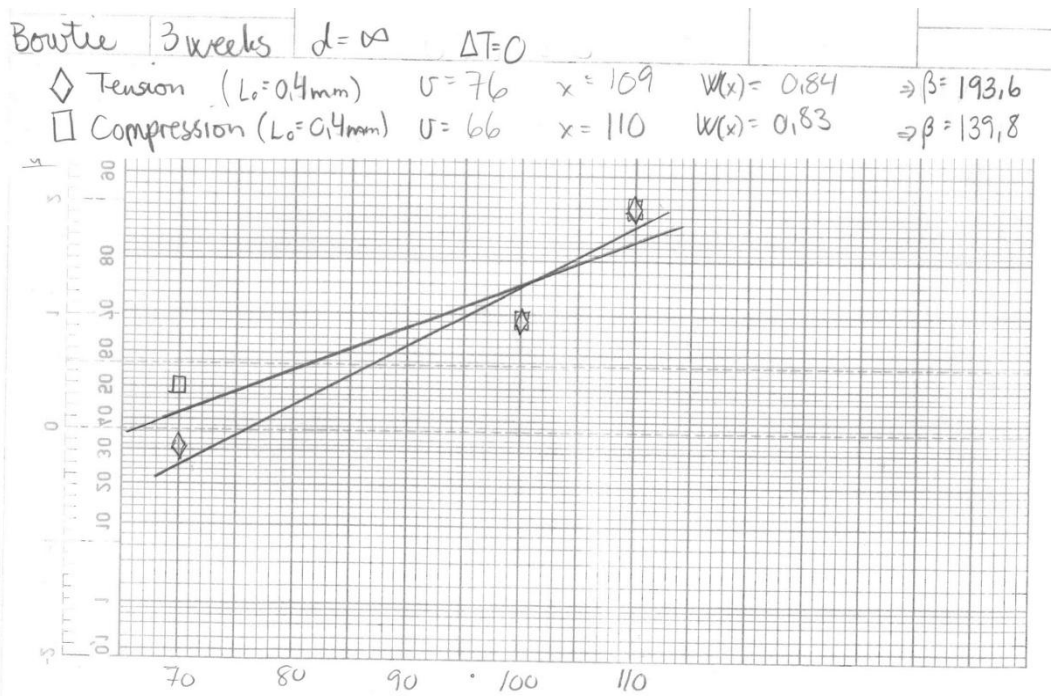
Statisk mekanisk belastede kabler, $T=60\text{ }^{\circ}\text{C}$

Plott av verdier fra sannsynlighetsberegning på ekstremalverdipapir fra eksperimentet med statisk mekanisk belastede kabler aldret i 3, 6 og 9 uker med $T=60\text{ }^{\circ}\text{C}$.

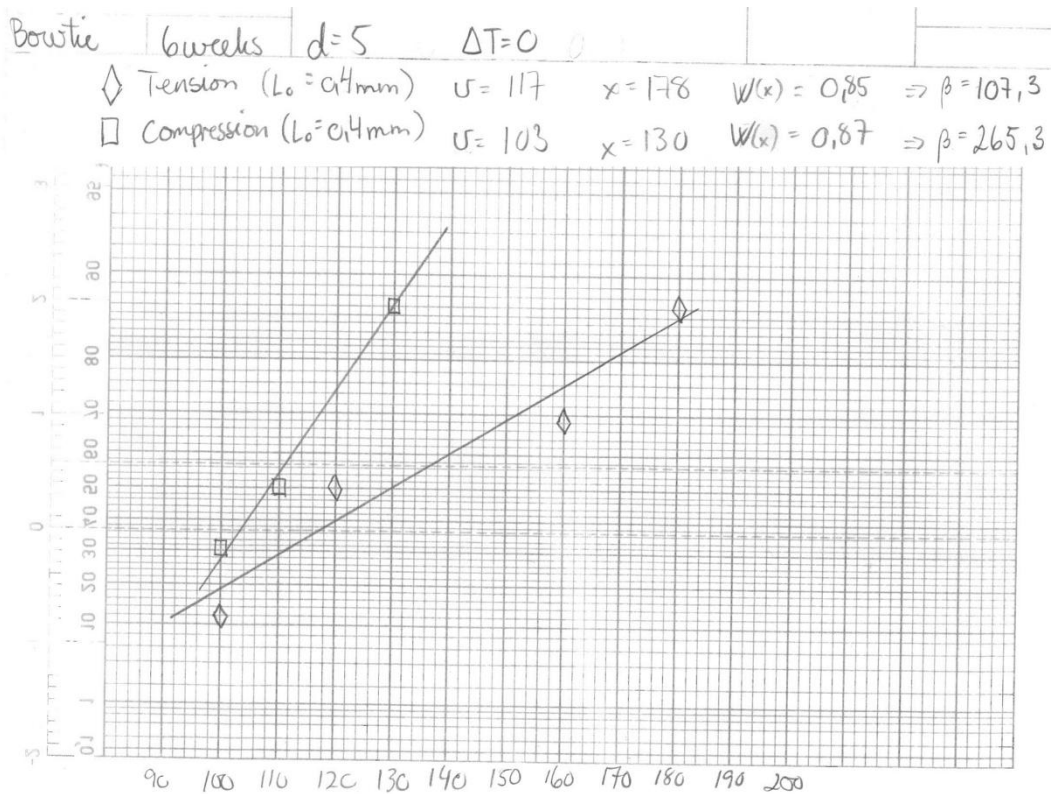
Bowtie, $\Delta T=0$:



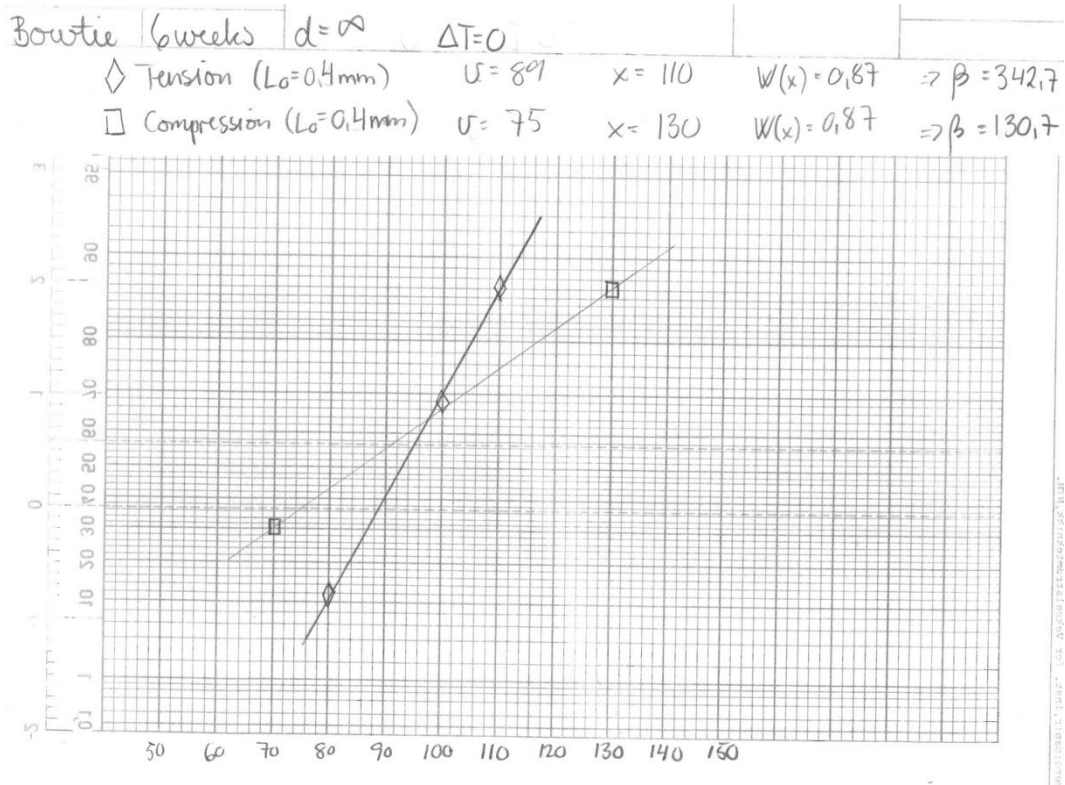
Figur A.15: Kumulativ sannsynlighetsfordeling av maksimal lengde av bowtie-trær per snitt (L_0) i bøyd kabel aldret i 3 uker ($\Delta T=0$).



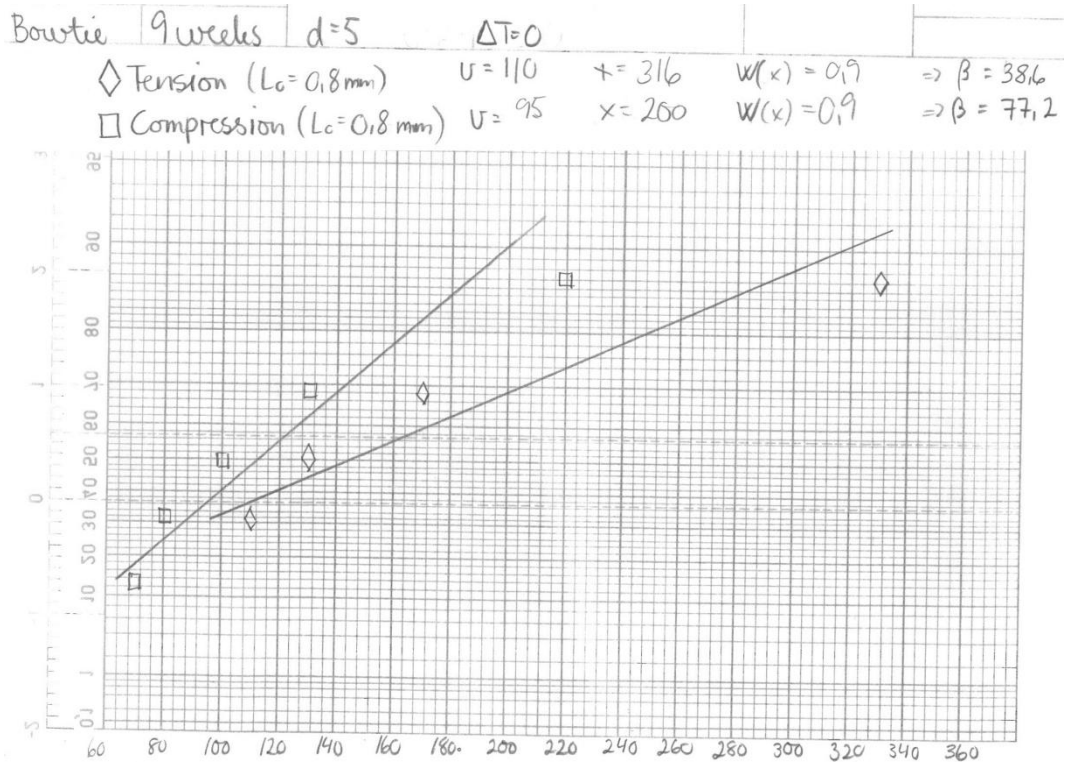
Figur A.16: Kumulativ sannsynlighetsfordeling av maksimal lengde av bowtie-trær per snitt (L_0) i rett kabel aldret i 3 uker ($\Delta T = 0$).



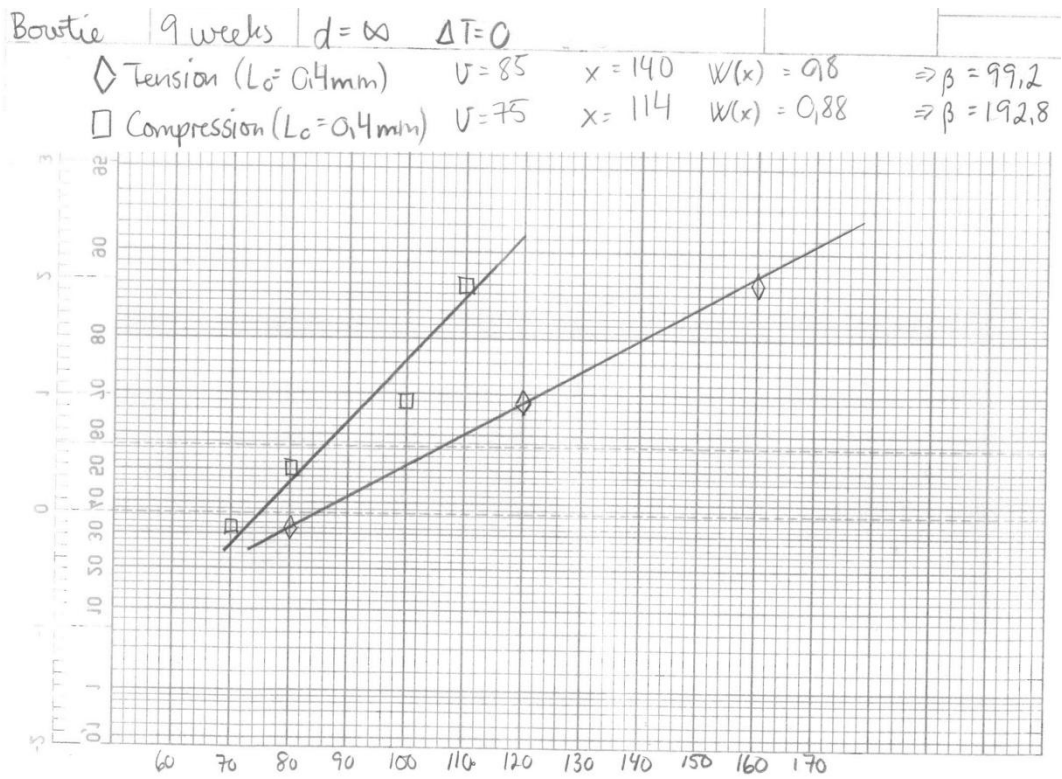
Figur A.17: Kumulativ sannsynlighetsfordeling av maksimal lengde av bowtie-trær per snitt (L_0) i bøyd kabel aldret i 6 uker ($\Delta T = 0$).



Figur A.18: Kumulativ sannsynlighetsfordeling av maksimal lengde av bowtie-trær per snitt (L_0) i rett kabel aldret i 6 uker ($\Delta T = 0$).

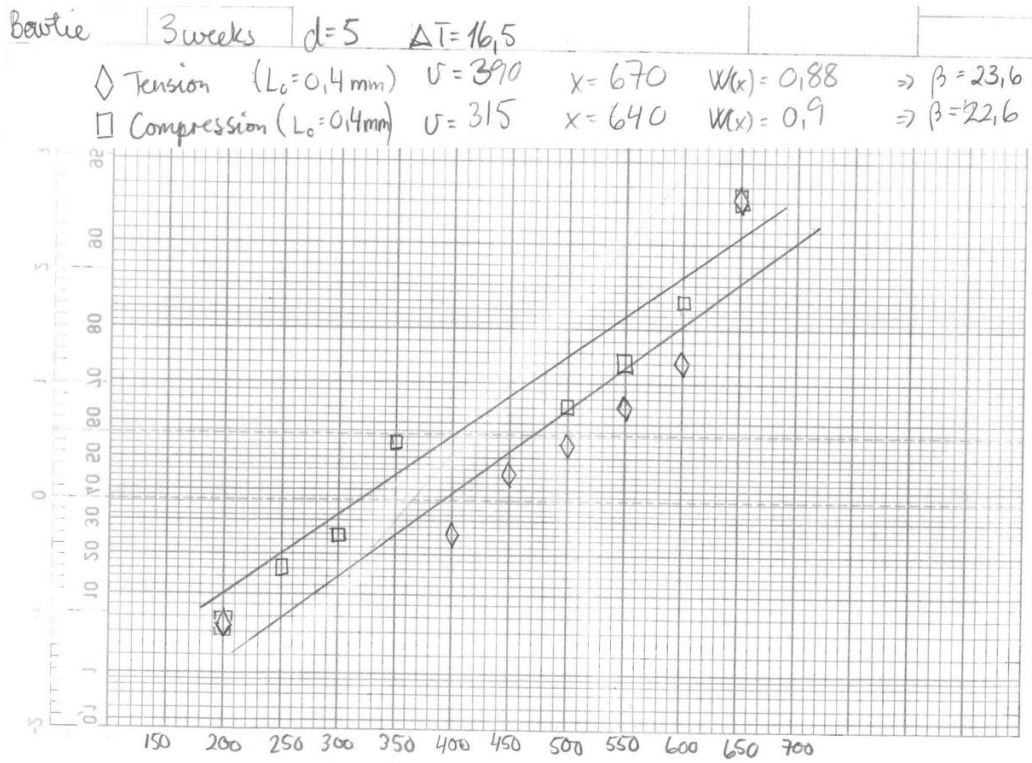


Figur A.19: Kumulativ sannsynlighetsfordeling av maksimal lengde av bowtie-trær per snitt (L_0) i bøyd kabel aldret i 9 uker ($\Delta T = 0$).

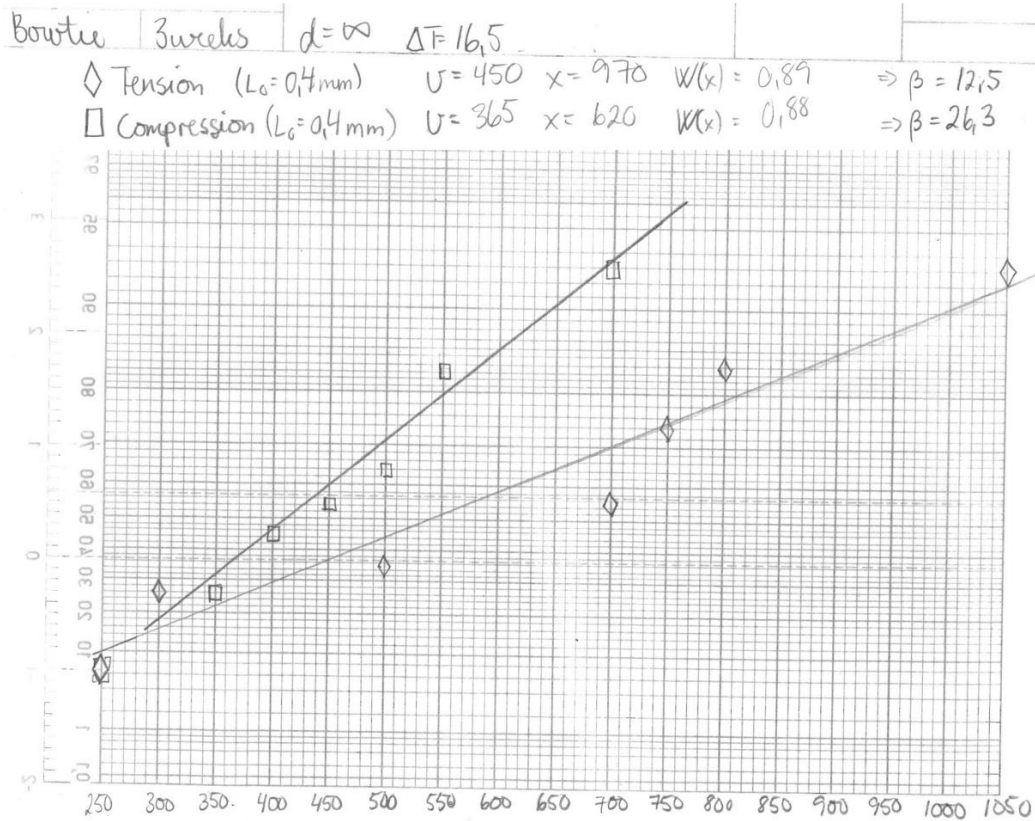


Figur A.20: Kumulativ sannsynlighetsfordeling av maksimal lengde av bowtie-trær per snitt (L_0) i rett kabel aldret i 9 uker ($\Delta T=0$).

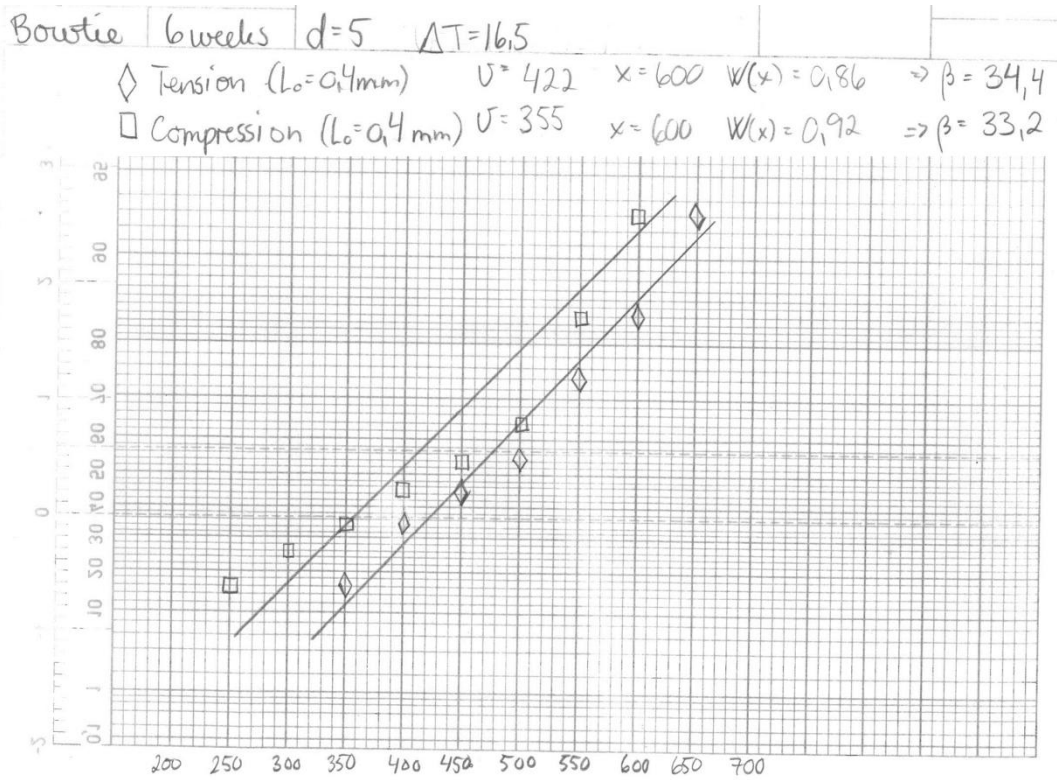
Bowtie, $\Delta T = 16,5$ K:



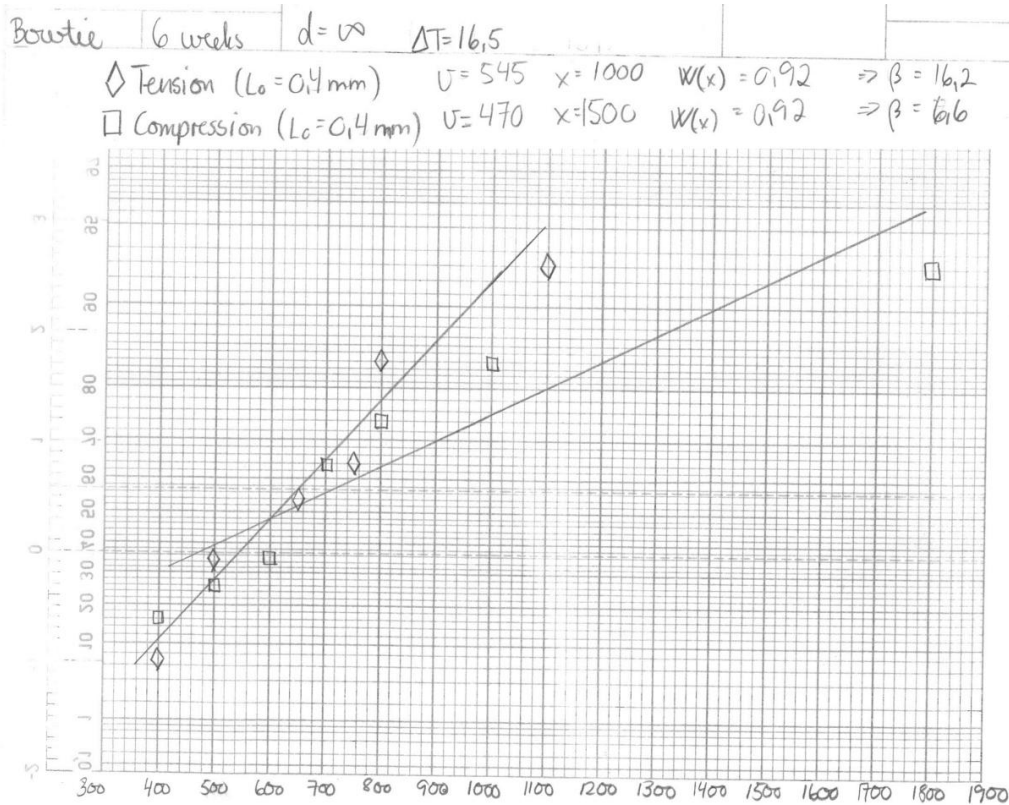
Figur A.21: Kumulativ sannsynlighetsfordeling av maksimal lengde av bowtie-trær per snitt (L_0) i bøyd kabel aldret i 3 uker ($\Delta T = 16,5$).



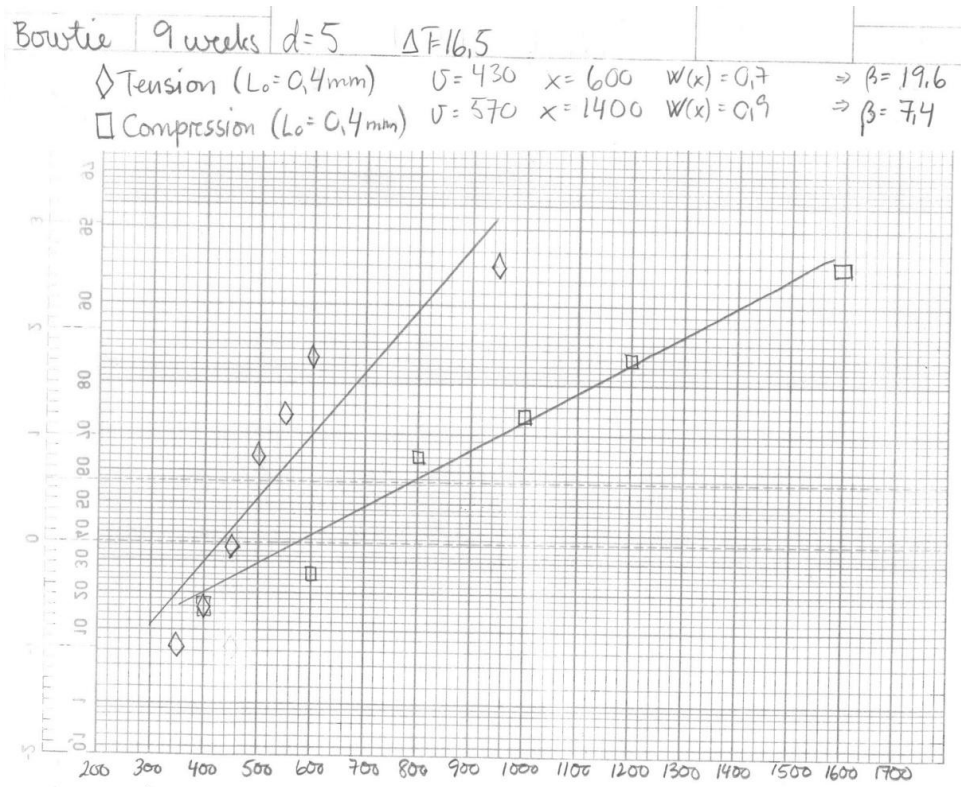
Figur A.22: Kumulativ sannsynlighetsfordeling av maksimal lengde av bowtie-trær per snitt (L_0) i rett kabel aldret i 3 uker ($\Delta T = 16,5$).



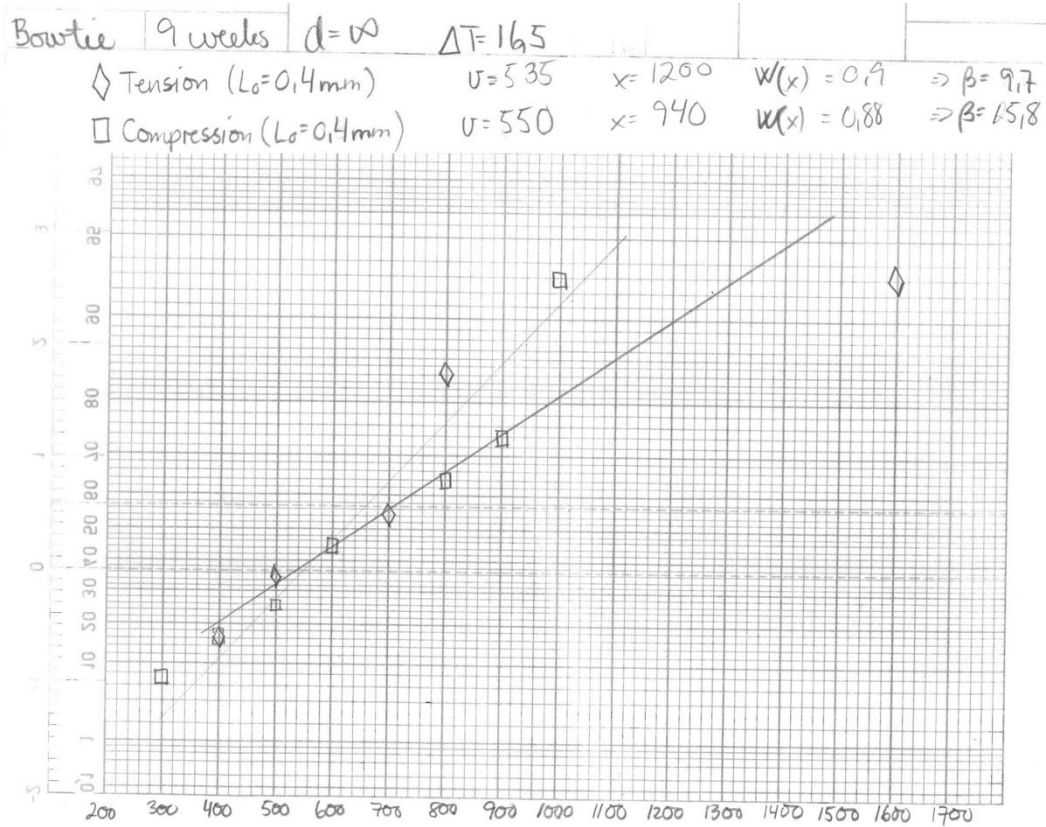
Figur A.23: Kumulativ sannsynlighetsfordeling av maksimal lengde av bowtie-trær per snitt (L_0) i bøyd kabel aldre i 6 uker ($\Delta T=16,5$).



Figur A.24: Kumulativ sannsynlighetsfordeling av maksimal lengde av bowtie-trær per snitt (L_0) i rett kabel aldre i 6 uker ($\Delta T=16,5$).

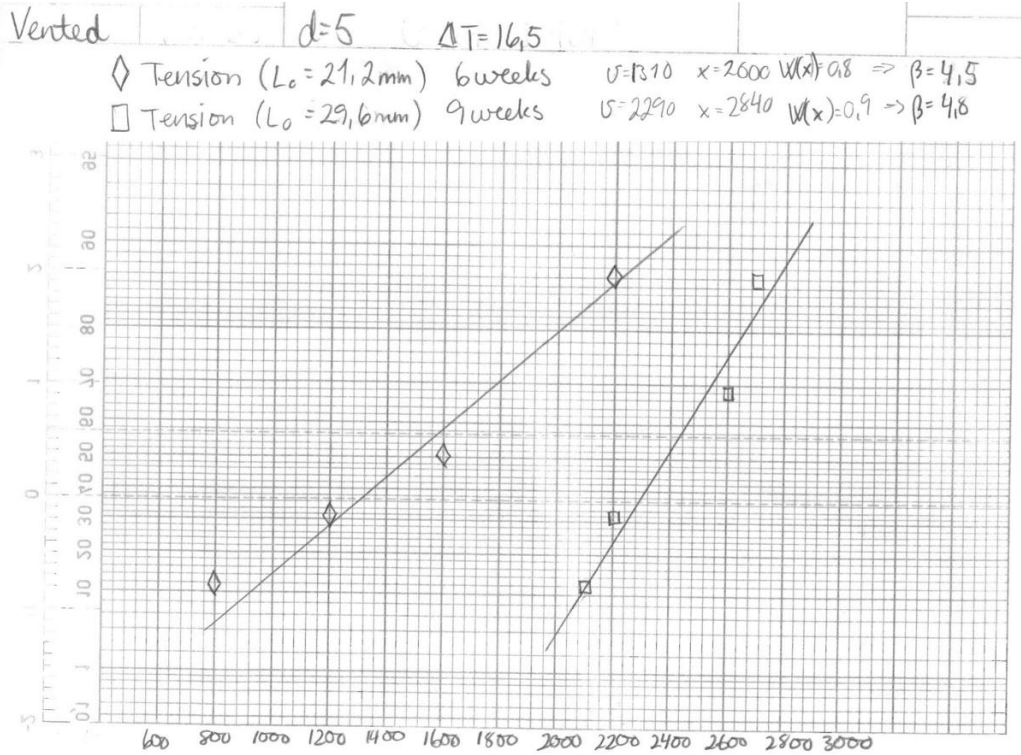


Figur A.25: Kumulativ sannsynlighetsfordeling av maksimal lengde av bowtie-trær per snitt (L_0) i bøyd kabel aldret i 9 uker ($\Delta T=16,5$).

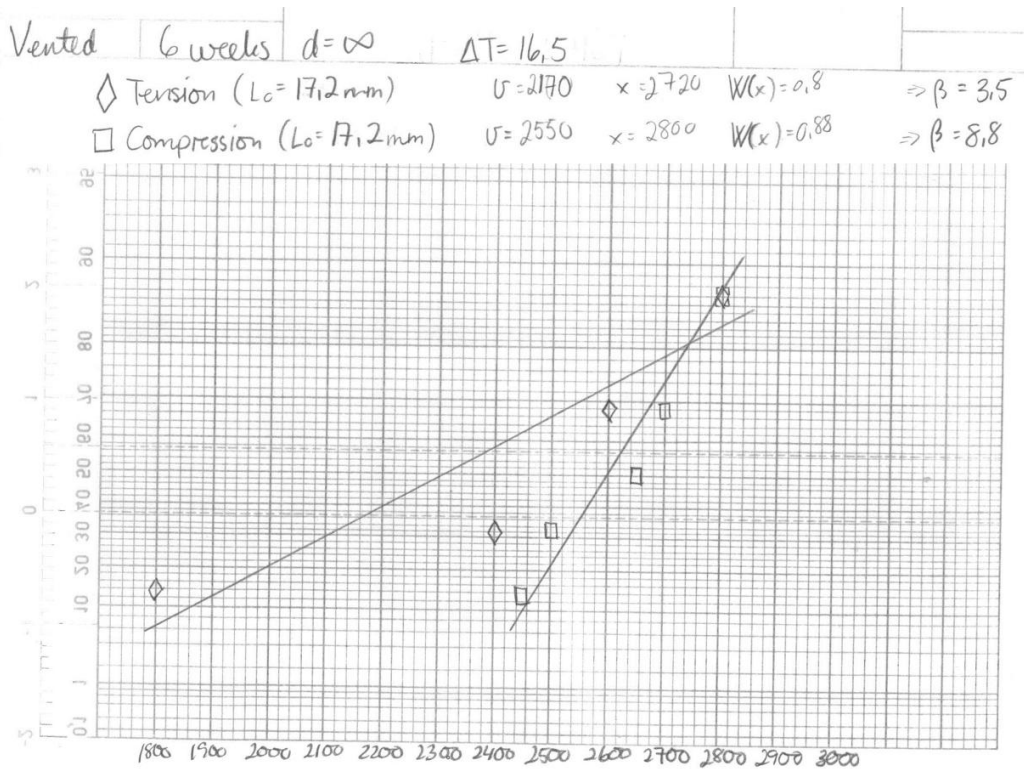


Figur A.26: Kumulativ sannsynlighetsfordeling av maksimal lengde av bowtie-trær per snitt (L_0) i rett kabel aldret i 9 uker ($\Delta T=16,5$).

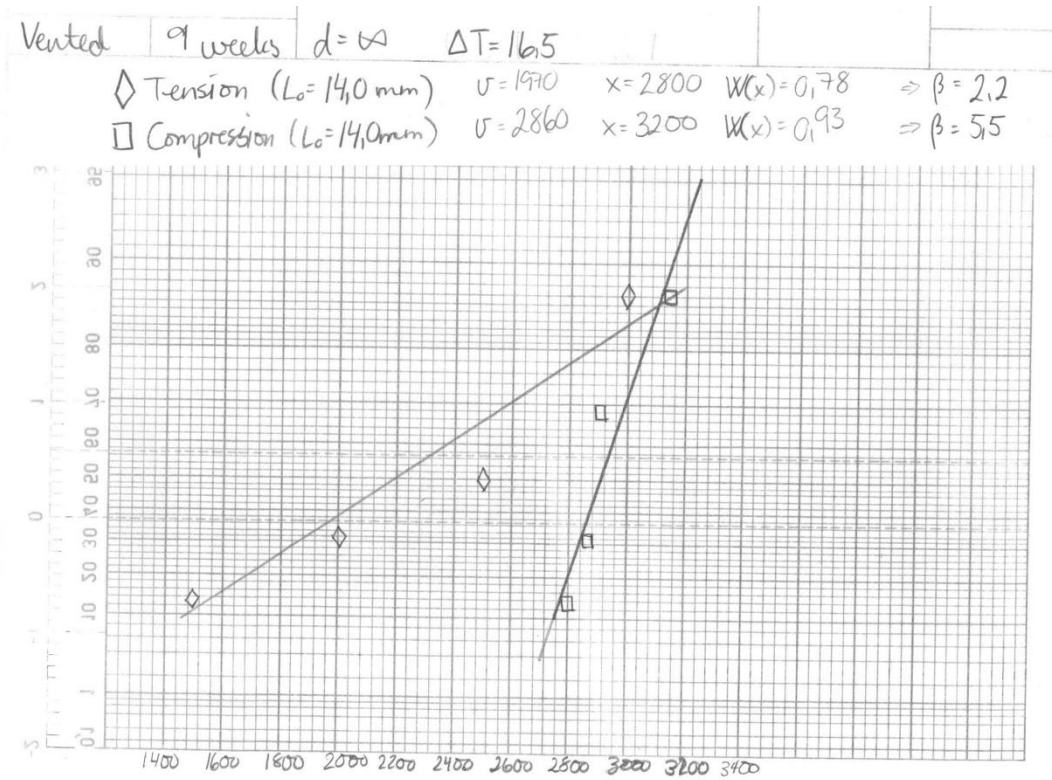
Ventilerte trær, $\Delta T=16,5$ K:



Figur A.27: Kumulativ sannsynlighetsfordeling av maksimal lengde av ventilerte trær ved indre halvleder per snitt (L_0) i bøyd kabel aldret i 6 og 9 uker ($\Delta T=16,5$).



Figur A.28: Kumulativ sannsynlighetsfordeling av maksimal lengde av ventilerte trær ved indre halvleder per snitt (L_0) i rett kabel aldret i 6 uker ($\Delta T=16,5$).

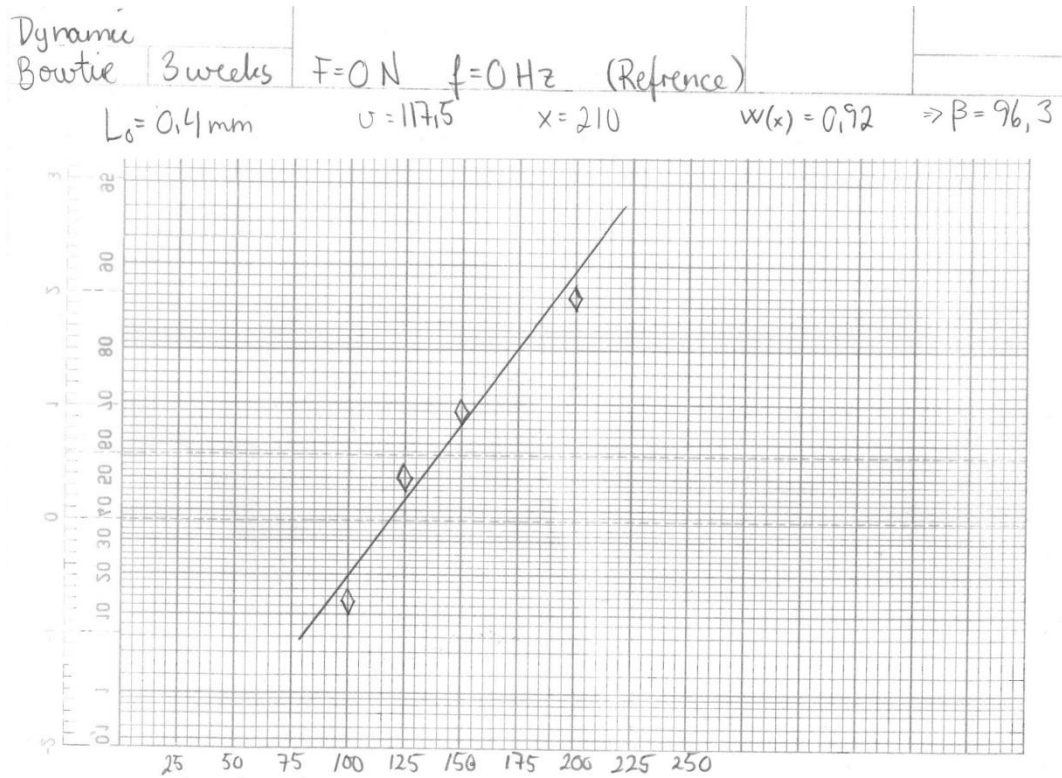


Figur A.29: Kumulativ sannsynlighetsfordeling av maksimal lengde av ventilerte trær ved indre halvleder per snitt (L_0) i rett kabel aldret i 9 uker ($\Delta T = 16,5$).

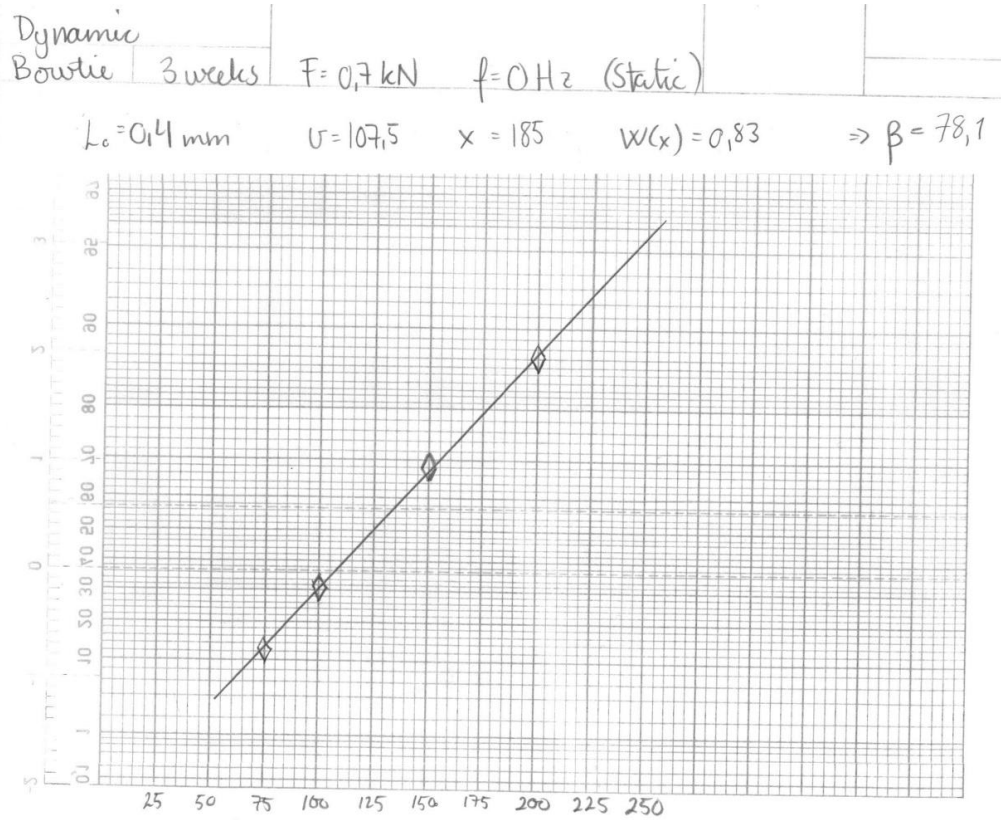
Appendiks 14 - Plott av sannsynlighetsfordeling på ekstremalverdipapir

Dynamisk mekanisk belastede kabler, $T=30\text{ }^{\circ}\text{C}$

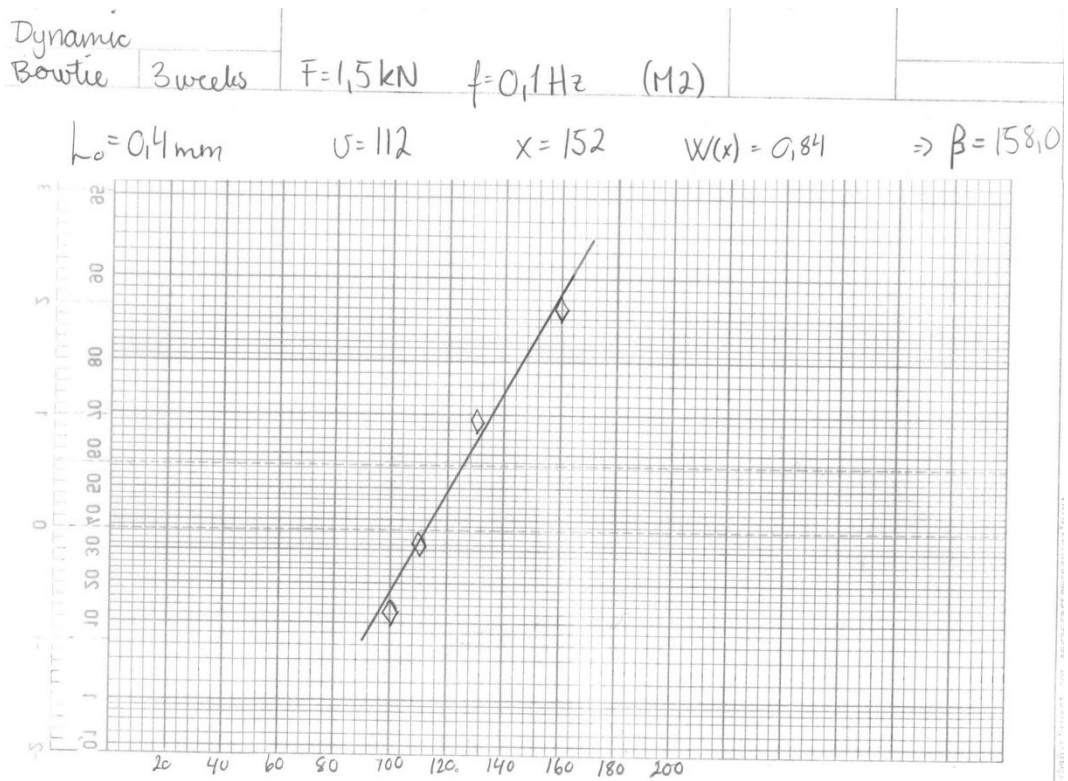
Plott av verdier fra sannsynlighetsberegning på ekstremalverdipapir fra eksperimentet med statisk mekanisk og dynamisk mekanisk belastede kabler aldret i 3 uker med $T=30\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Figur A.30: Kumulativ sannsynlighetsfordeling av maksimal lengde av bowtie-trær per snitt (L_0) i kabel aldret i 3 uker ($\epsilon=0\text{ }%$ og $f=0\text{ Hz}$, Referanse).



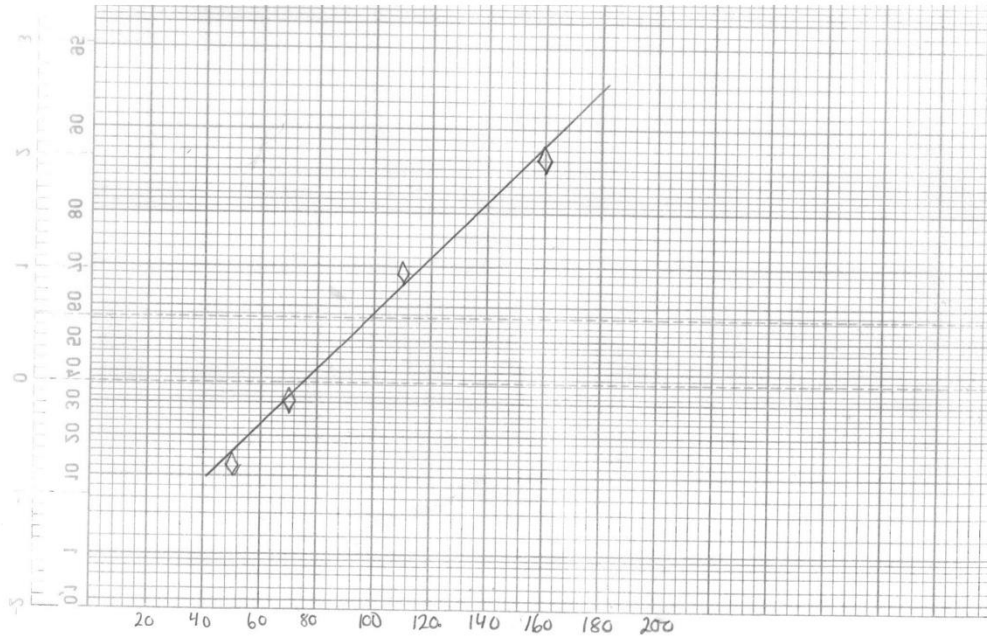
Figur A.31: Kumulativ sannsynlighetsfordeling av maksimal lengde av bowtie-trær per snitt (L_0) i kabel aldre i 3 uker ($\epsilon=6\%$ og $f=0 \text{ Hz}$, Statisk).



Figur A.32: Kumulativ sannsynlighetsfordeling av maksimal lengde av bowtie-trær per snitt (L_0) i kabel aldre i 3 uker ($\epsilon=6\%$ og $f=0,1 \text{ Hz}$, Dynamisk (M2)).

Dynamic
Bowtie 3 weeks $F=1,3 \text{ kN}$ $f=1,0 \text{ Hz}$ (M1)

$L_0=0,4 \text{ mm}$ $v=74$ $x=152$ $W(x)=0,86$ $\Rightarrow \beta=88,2$



Figur A.33: Kumulativ sannsynlighetsfordeling av maksimal lengde av bowtie-trær per snitt (L_0) i kabel aldret i 3 uker ($\epsilon=6\%$ og $f=1 \text{ Hz}$, Dynamisk (M1)).

Appendiks 15 - Resultater fra bruk av ekstremalverdistatistikk

Statisk mekanisk belastede kabler

$T=30\text{ }^{\circ}\text{C}$:

Aldringstiden til alle kablene er 3 uker.

Tabell A.17: Parametre fra ligning (3.2), $W(x)$, beregnet fra sannsynlighetsfordelingen og korresponderende 95 %, 50 % og 5 % sannsynlighet for at den maksimale lengden av bowtie-trær i en 1 m lang kabel overstiger den gitte verdien av l_{\max} ($\Delta T=0$).

| Bowtie $\Delta T=0$ | Strekkssone | | | | | Kompresjonsone | | | | |
|------------------------|---------------------------|--------------------------|---------|---|-----|----------------|--------------------------|---------|---|-----|
| | Bøye- diameter [mm] | v [μm] | β | l_{\max} [μm] i en 1 m lang kabel | | | v [μm] | β | l_{\max} [μm] i en 1 m lang kabel | |
| | | | 95% | 50% | 5% | | | 95% | 50% | 5% |
| 50 | 180 | 44,9 | 560 | 660 | 840 | 102 | 454,9 | 140 | 150 | 170 |
| ∞ | 82 | 118,4 | 220 | 260 | 340 | 106 | 296,8 | 160 | 180 | 210 |

Tabell A.18: Parametre fra ligning (3.2), $W(x)$, beregnet fra sannsynlighetsfordelingen og korresponderende 95 %, 50 % og 5 % sannsynlighet for at den maksimale lengden av bowtie-trær i en 1 m lang kabel overstiger den gitte verdien av l_{\max} ($\Delta T=15\text{ K}$).

| Bowtie $\Delta T=15$ | Strekkssone | | | | | Kompresjonsone | | | | |
|-------------------------|---------------------------|--------------------------|---------|---|-----|----------------|--------------------------|---------|---|-----|
| | Bøye- diameter [mm] | v [μm] | β | l_{\max} [μm] i en 1 m lang kabel | | | v [μm] | β | l_{\max} [μm] i en 1 m lang kabel | |
| | | | 95% | 50% | 5% | | | 95% | 50% | 5% |
| 50 | 250 | 66,6 | 520 | 590 | 710 | 212 | 76,2 | 450 | 510 | 620 |
| ∞ | 158 | 82,0 | 420 | 480 | 580 | 130 | 78,5 | 400 | 470 | 570 |

Tabell A.19: Parametre fra ligning (3.2), $W(x)$, beregnet fra sannsynlighetsfordelingen og korresponderende 95 %, 50 % og 5 % sannsynlighet for at den maksimale lengden av ventilerte trær ved indre halvleder i en 1 m lang kabel overstiger den gitte verdien av l_{\max} ($\Delta T=15\text{ K}$).

| Vented $\Delta T=15$ | Strekkssone | | | | | Kompresjonsone | | | | |
|-------------------------|---------------------------|--------------------------|---------|---|-----|----------------|--------------------------|---------|---|-----|
| | Bøye- diameter [mm] | v [μm] | β | l_{\max} [μm] i en 1 m lang kabel | | | v [μm] | β | l_{\max} [μm] i en 1 m lang kabel | |
| | | | 95% | 50% | 5% | | | 95% | 50% | 5% |
| 50 | 316 | 162,5 | 370 | 400 | 450 | - | - | - | - | - |
| ∞ | 240 | 106,7 | 330 | 380 | 460 | 256 | 301,3 | 290 | 310 | 340 |

$T=60\text{ }^{\circ}\text{C}$:

Tabell A.20: Parametre fra ligning (3.2), $W(x)$, beregnet fra sannsynlighetsfordelingen og korresponderende 95 %, 50 % og 5 % sannsynlighet for at den maksimale lengden av bowtie-trær i en 1 m lang kabel overstiger den gitte verdien av l_{\max} ($\Delta T=0$).

| Bowtie $\Delta T=0$ | | Strekksone | | | | | Kompresjonssone | | | | |
|---------------------|---------------------|---------------------|---------|--|-----|-----|---------------------|---------|--|-----|-----|
| Bøye-diameter [mm] | Aldrings-tid [uker] | v [μm] | β | l_{\max} [μm] i en 1 m lang kabel | | | v [μm] | β | l_{\max} [μm] i en 1 m lang kabel | | |
| | | | | 95% | 50% | 5% | | | 95% | 50% | 5% |
| 50 | 3 | 75 | 79,2 | 350 | 410 | 520 | 70 | 164,5 | 200 | 230 | 290 |
| | 6 | 117 | 107,3 | 340 | 380 | 470 | 103 | 265,3 | 190 | 210 | 250 |
| | 9 | 110 | 38,6 | 640 | 750 | 950 | 95 | 77,2 | 370 | 430 | 540 |
| ∞ | 3 | 76 | 193,6 | 200 | 230 | 280 | 66 | 139,8 | 240 | 280 | 340 |
| | 6 | 89 | 342,7 | 160 | 180 | 200 | 75 | 130,7 | 260 | 300 | 370 |
| | 9 | 85 | 99,2 | 330 | 380 | 460 | 75 | 192,8 | 200 | 230 | 280 |

Tabell A.21: Parametre fra ligning (3.2), $W(x)$, beregnet fra sannsynlighetsfordelingen og korresponderende 95 %, 50 % og 5 % sannsynlighet for at den maksimale lengden av bowtie-trær i en 1 m lang kabel overstiger den gitte verdien av l_{\max} ($\Delta T=16,5\text{ K}$).

| Bowtie $\Delta T=16,5\text{ K}$ | | Strekksone | | | | | Kompresjonssone | | | | |
|---------------------------------|---------------------|---------------------|---------|--|------|------|---------------------|---------|--|------|------|
| Bøye-diameter [mm] | Aldrings-tid [uker] | v [μm] | β | l_{\max} [μm] i en 1 m lang kabel | | | v [μm] | β | l_{\max} [μm] i en 1 m lang kabel | | |
| | | | | 95% | 50% | 5% | | | 95% | 50% | 5% |
| 50 | 3 | 390 | 23,6 | 1220 | 1380 | 1620 | 315 | 22,6 | 1200 | 1360 | 1620 |
| | 6 | 422 | 34,4 | 1010 | 1130 | 1320 | 355 | 33,2 | 980 | 1100 | 1300 |
| | 9 | 430 | 19,6 | 1390 | 1560 | 1840 | 570 | 7,4 | 2470 | 2700 | 3010 |
| ∞ | 3 | 450 | 12,5 | 1820 | 2040 | 2360 | 365 | 26,3 | 1130 | 1270 | 1510 |
| | 6 | 545 | 16,2 | 1630 | 1820 | 2100 | 470 | 6,6 | 2570 | 2800 | 3110 |
| | 9 | 535 | 9,7 | 2140 | 2370 | 2690 | 550 | 15,8 | 1660 | 1840 | 2130 |

Tabell A.22: Parametre fra ligning (3.2), $W(x)$, beregnet fra sannsynlighetsfordelingen og korresponderende 95 %, 50 % og 5 % sannsynlighet for at den maksimale lengden av ventilerte trær ved indre halvleder i en 1 m lang kabel overstiger den gitte verdien av l_{\max} ($\Delta T=16,5\text{ K}$).

| Vented $\Delta T=16,5\text{ K}$ | | Strekksone | | | | | Kompresjonssone | | | | |
|---------------------------------|---------------------|---------------------|---------|--|------|------|---------------------|---------|--|------|------|
| Bøye-diameter [mm] | Aldrings-tid [uker] | v [μm] | β | l_{\max} [μm] i en 1 m lang kabel | | | v [μm] | β | l_{\max} [μm] i en 1 m lang kabel | | |
| | | | | 95% | 50% | 5% | | | 95% | 50% | 5% |
| 50 | 3 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | 6 | 1310 | 4,5 | 2430 | 2800 | 3210 | - | - | - | - | - |
| | 9 | 2290 | 4,8 | 2870 | 3100 | 3370 | - | - | - | - | - |
| ∞ | 3 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | 6 | 2170 | 3,5 | 3070 | 3540 | 3540 | 2550 | 8,8 | 2890 | 3030 | 3210 |
| | 9 | 1970 | 2,2 | 3330 | 3530 | 3680 | 2860 | 5,5 | 3250 | 3370 | 3510 |

Dynamisk mekanisk belastning av kabler

Tabell A.23: Parametre fra ligning (3.2), $W(x)$, beregnet fra sannsynlighetsfordelingen og korresponderende 95 %, 50 % og 5 % sannsynlighet for at den maksimale lengden av bowtie-trær i en 1 m lang kabel overstiger den gitte verdien av l_{\max} .

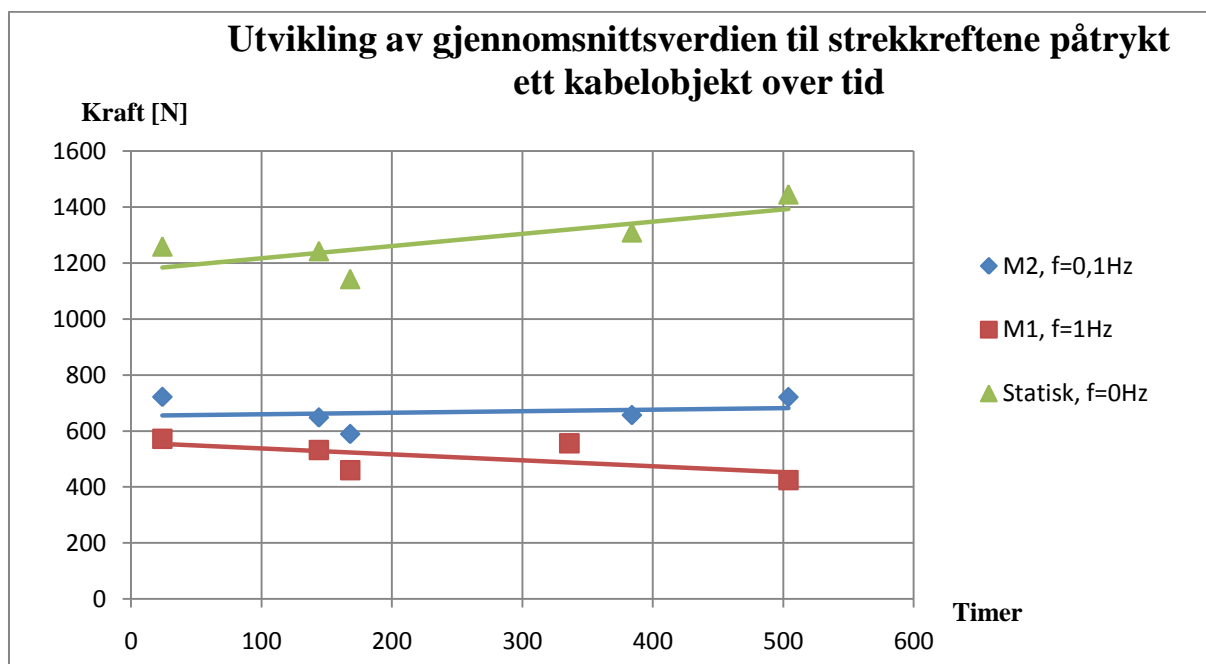
| Bowtie-trær. 3 uker aldringstid, $T=30\text{ °C}$ $\Delta T=0$ | | | | | |
|--|--------------------------|---------|---|-----|-----|
| Type kabel | v [μm] | β | l_{\max} [μm] i en 1 m lang kabel | | |
| | | | 95% | 50% | 5% |
| $\varepsilon=0\%$, $f=0\text{Hz}$ Referanse | 117,5 | 96,3 | 360 | 410 | 500 |
| $\varepsilon=6\%$, $f=0\text{Hz}$ Statisk | 107,5 | 78,1 | 410 | 470 | 580 |
| $\varepsilon=6\%$, $f=0,1\text{Hz}$ Dynamisk (M2) | 112,0 | 158,0 | 260 | 300 | 350 |
| $\varepsilon=6\%$, $f=1\text{Hz}$ Dynamisk (M1) | 74,0 | 88,2 | 340 | 400 | 500 |

Appendiks 16 - Målinger av strekkrefter

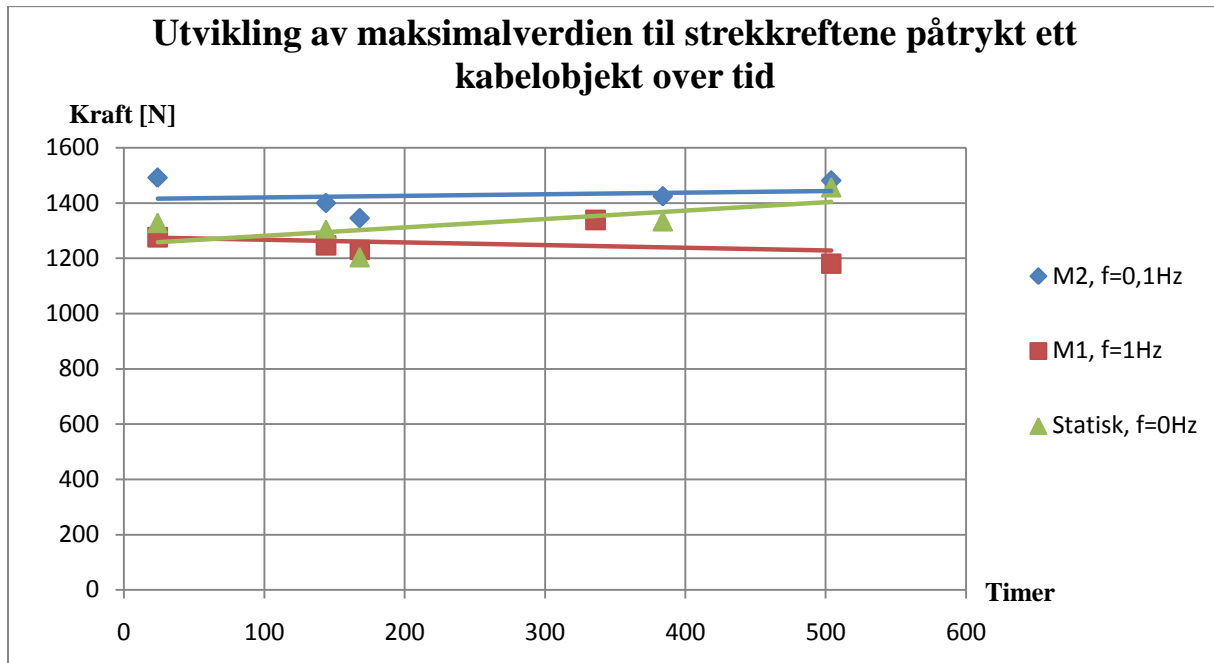
For å ha kontroll på når eventuelle feil eller brudd i testtriggen oppstod, ble strekkreftene logget hvert femte minutt under hele forsøket.

I tillegg ble kreftene logget med tidsintervall på 90 ms i omtrent én time etter 1, 6, 7, 14, 16 og 21 døgn. Når en polymer strekkes og holdes i strukket posisjon vil polymeren relaksere (strekke seg) og kraften vil gradvis avta med tiden. Etter en stund, timer/dager, vil kraften stabilisere seg. Da har relaksasjonen stoppet. Målingene av strekkreftene ble gjennomført for å se på utviklingen av kreftene, for å kunne avgjøre om isolasjonen har relaksert. Utviklingen av gjennomsnittsverdien til strekkreftene og utviklingen av maksimalverdien til strekkreftene er plottet i henholdsvis Figur A.34 og Figur A.35.

I oppsettet av kabelobjektene i den dynamiske testtriggen var to kabler festet til hver av motorene, mens kun én kabel var festet i det statiske festepunktet. Strekkreftene som er målt for motorene er omtrent dobbelt så stor som for den statiske. Kraften vil bli dobbelt så stor med to kabler. Jeg har derfor dividert de målte verdiene av strekkreftene, for kablene festet til motorene, med to for å vise kreftene påtrykt ett enkelt kabelobjekt.



Figur A.34: Utvikling av gjennomsnittsverdien til strekkreftene påtrykt ett kabelobjekt over tid.



Figur A.35: Utvikling av maksimalverdien til strekkreftene påtrykt ett kabelobjekt over tid.

Det er kun strekkreftene fra motoren med $f=1$ Hz som antyder at isolasjonen har relaxert. Det kommer av at verdiene har en negativ trend.

Appendiks 17 - Temperaturmålinger

Vanntemperaturen ble logget hvert femte minutt under hele forsøksperioden.

I forsøket med statisk mekanisk belastning av kablene i vann med $T=30\text{ °C}$ var gjennomsnittstemperaturen på vannet og ved ytre halvleder henholdsvis $32,6\text{ °C}$ og $33,6\text{ °C}$.

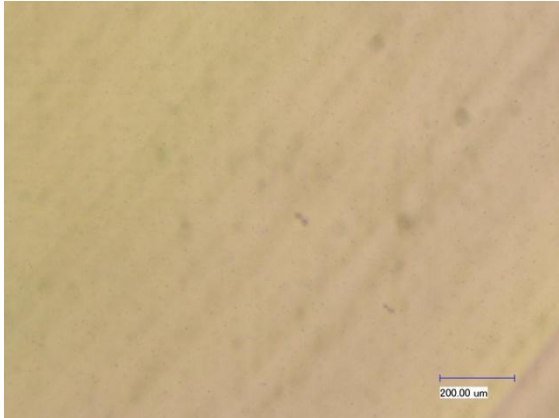
I forsøket med statisk mekanisk belastning av kablene i vann med $T=60\text{ °C}$ var gjennomsnittstemperaturen på vannet og ved ytre halvleder henholdsvis $60,8\text{ °C}$ og $60,8\text{ °C}$.

Som forventet var temperaturen mer stabil ved 60 grader. Sirkulasjonspumpen har gitt god sirkulasjon på vannet i og med at gjennomsnittstemperaturen er lik for vannet og ved ytre halvleder.

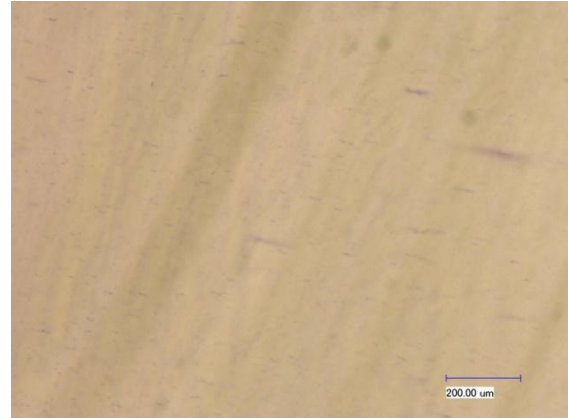
Appendiks 18 - Bilder av vanntrær

Statisk mekanisk belastede kabler

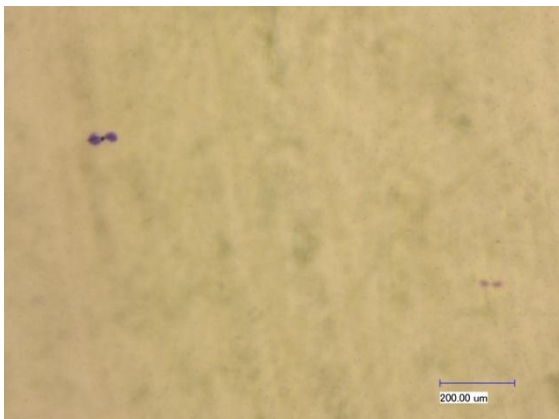
Bowtie-trær:



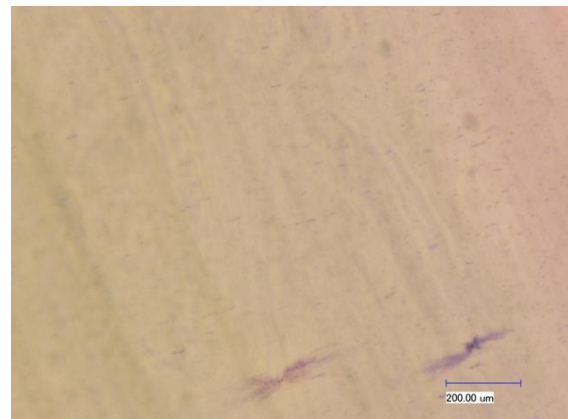
a) Aldret 3 uker, $d=50$ mm, $\Delta T=0$



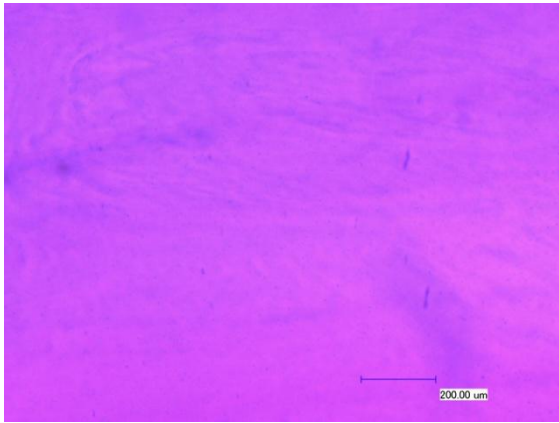
b) Aldret 3 uker, $d=50$ mm,
 $\Delta T=16,5$ K



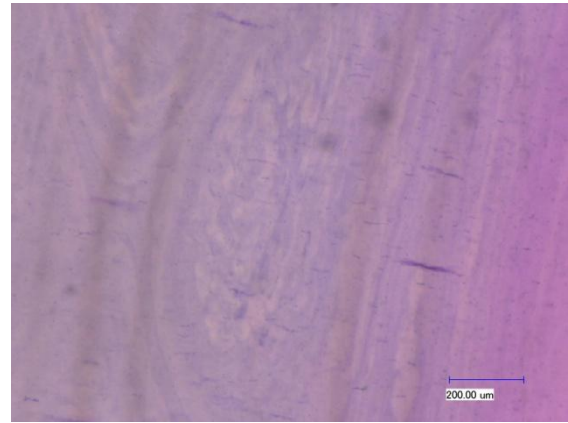
c) Aldret 3 uker, $d=\infty$ mm, $\Delta T=0$



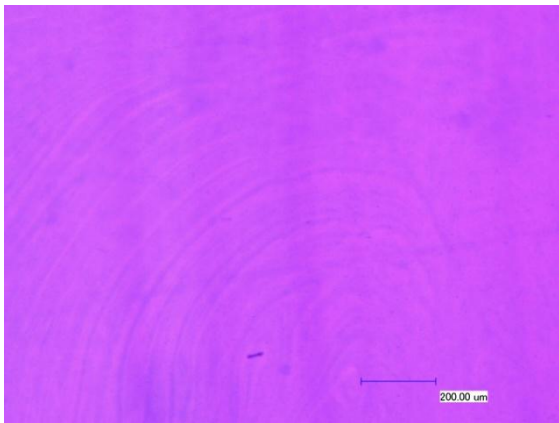
d) Aldret 3 uker, $d=\infty$ mm,
 $\Delta T=16,5$ K



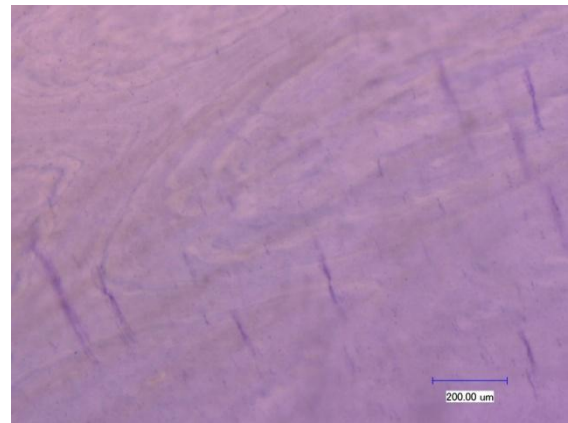
a) Aldret 6 uker, $d=50$ mm, $\Delta T=0$



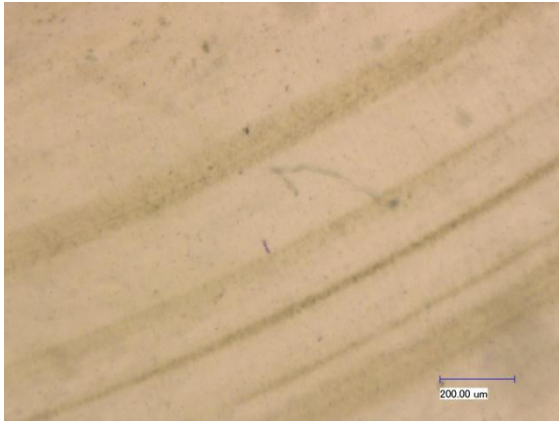
b) Aldret 6 uker, $d=50$ mm,
 $\Delta T=16,5$ K



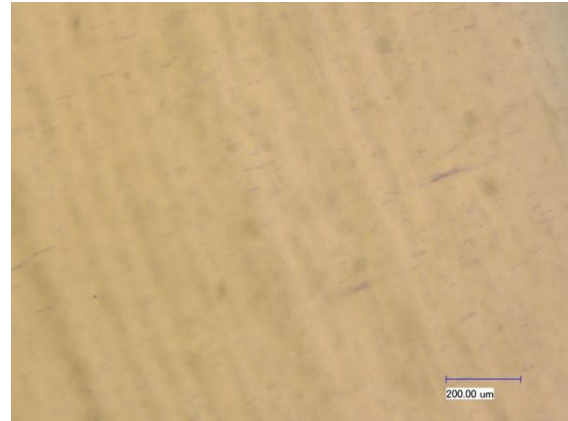
c) Aldret 6 uker, $d=\infty$ mm, $\Delta T=0$



d) Aldret 6 uker, $d=\infty$ mm,
 $\Delta T=16,5$ K



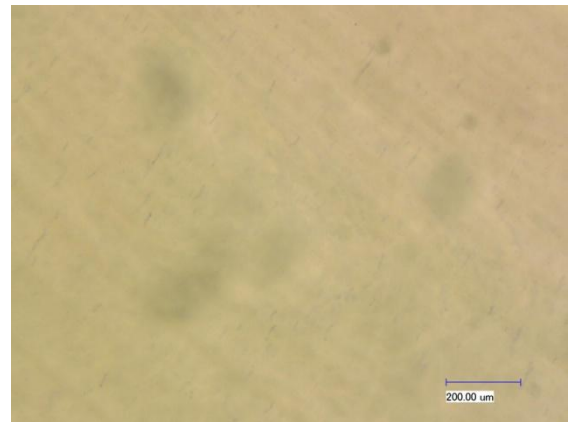
a) Aldret 9 uker, $d=50$ mm, $\Delta T=0$



b) Aldret 9 uker, $d=50$ mm,
 $\Delta T=16,5$ K

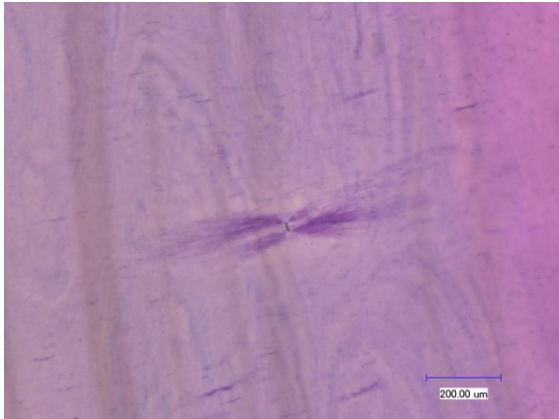


c) Aldret 9 uker, $d=\infty$ mm, $\Delta T=0$

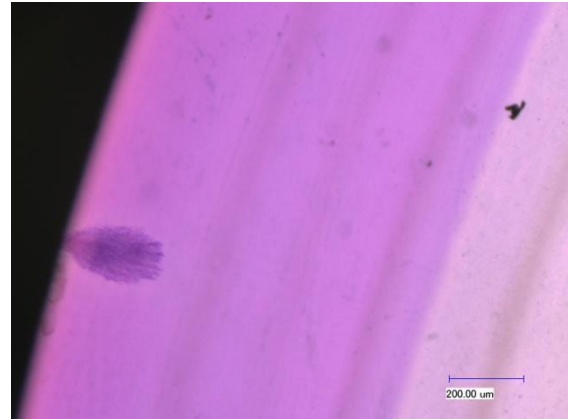


d) Aldret 9 uker, $d=\infty$ mm,
 $\Delta T=16,5$ K

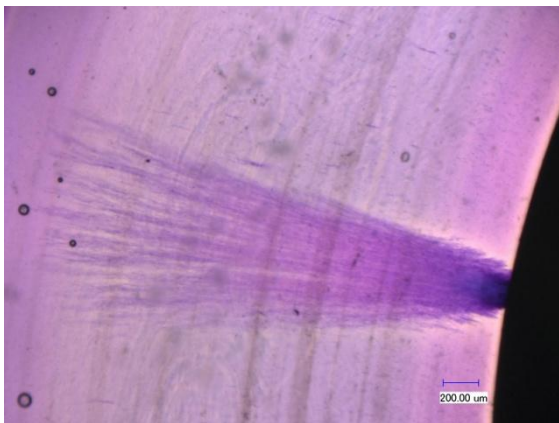
Diverse vanntrær:



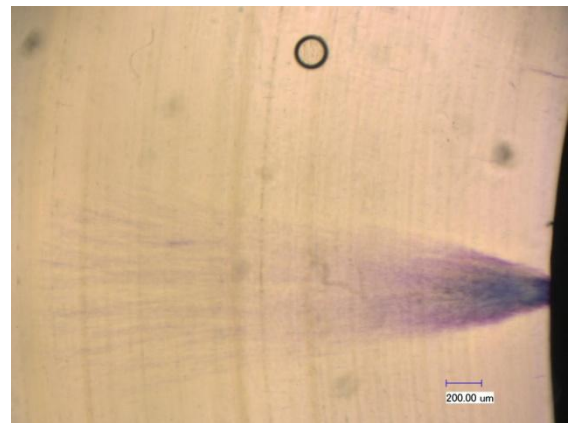
a) Stort bowtie-tre
Aldret 6 uker, $d=\infty$ mm,
 $\Delta T=16,5$ K



c) Ventilert tre ved ytre halvleder
Aldret 6 uker, $d=50$ mm,
 $\Delta T=16,5$ K



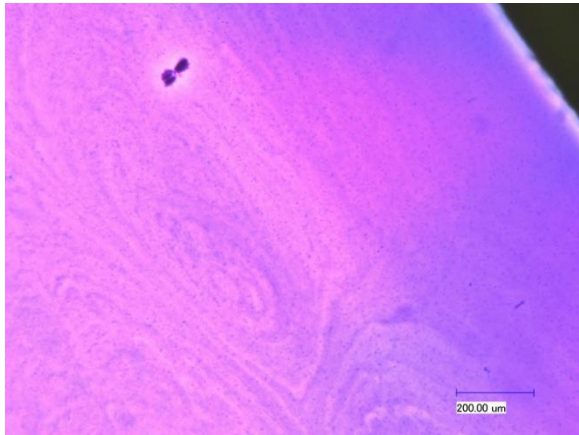
b) Stort ventilert tre ved indre halvleder
Aldret 6 uker, $d=\infty$ mm,
 $\Delta T=16,5$ K



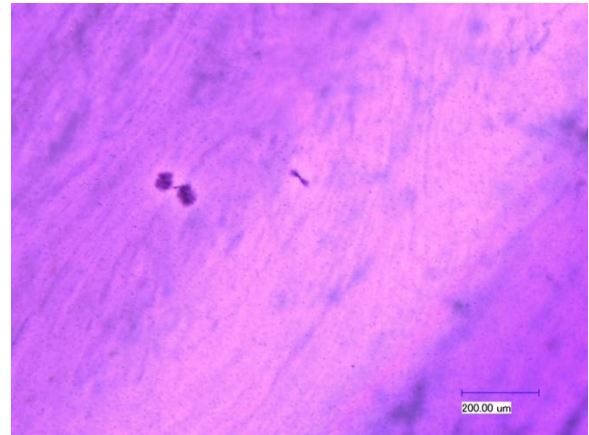
d) Stort ventilert tre ved indre halvleder
Aldret 9 uker, $d=\infty$ mm,
 $\Delta T=16,5$ K

Dynamisk mekanisk belastede kabler

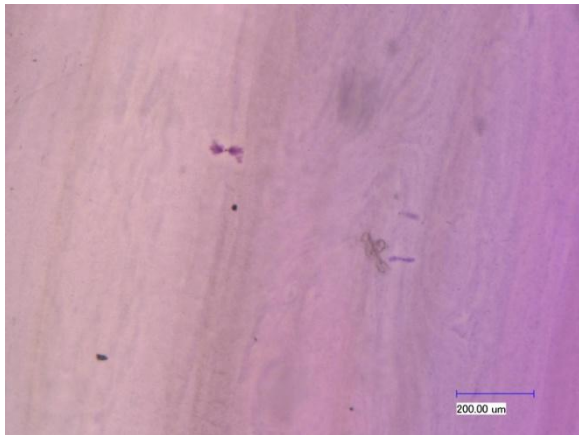
Bowtie-trær:



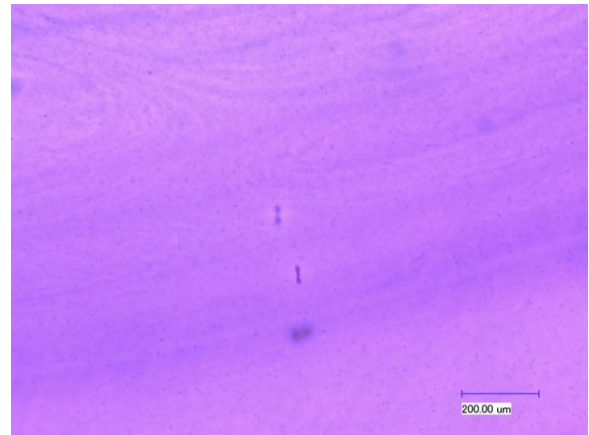
a) Referanse, $\epsilon=0\%$, $f=0$ Hz



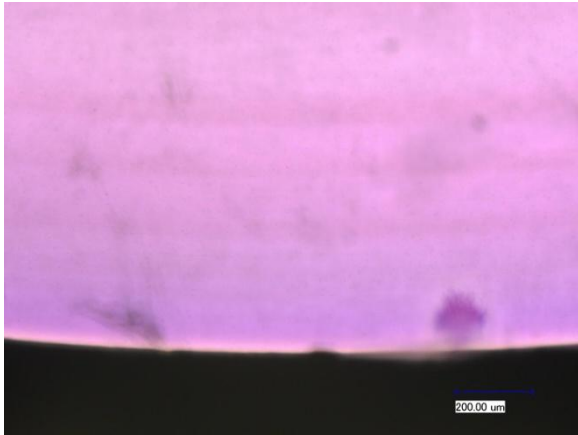
b) Statisk, $\epsilon=6\%$, $f=0$ Hz



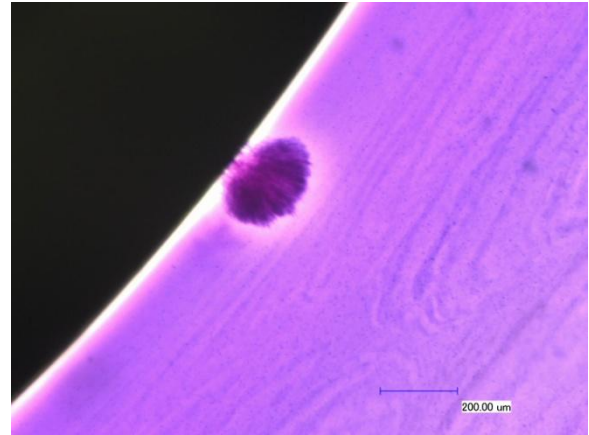
c) Dynamisk, $\epsilon=6\%$, $f=0,1$ Hz



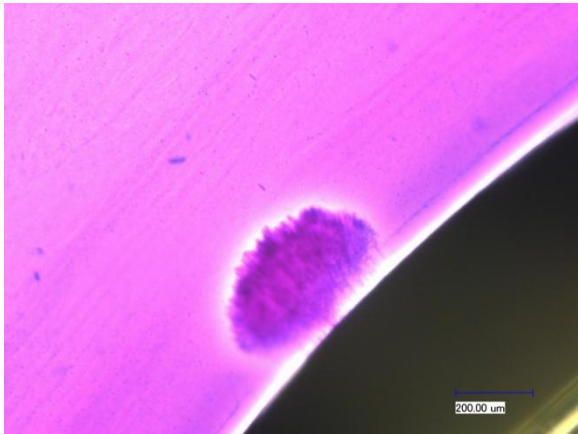
d) Dynamisk, $\epsilon=6\%$, $f=1$ Hz

Ventilerte trær:

a) Dynamisk, $\epsilon=6\%$, $f=0,1$ Hz, ventilert tre ved ytre halvleder



b) Dynamisk, $\epsilon=6\%$, $f=1$ Hz, ventilert tre ved indre halvleder



c) Statisk, $\epsilon=6\%$, $f=0$ Hz, ventilert tre ved indre halvleder