

Virkning av mekanisk spenning på vanntrevekst i PEX isolerte høyspentkabler

Simon Årdal Aarseth

Master i energi og miljø

Innlevert: juni 2013

Hovedveileder: Erling Ildstad, ELKRAFT

Medveileder: Hallvard Faremo, ELKRAFT

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Institutt for elkraftteknikk



Hovedoppgave våren 2013

Kandidatens navn: Simon Årdal Aarseth

Fag: ELKRAFTTEKNIKK

Oppgavens tittel (norsk): Virkning av mekanisk spenning på vanntrevekst i PEX isolerte høyspentkabler.

Oppgavens tittel (engelsk): Effect of mechanical tension on Water Treeing in XLPE power Cables.

Dersom PEX kabelisolasjon eksponeres mot fuktighet vil det i isolasjonen dannes vanntrær, som reduserer kabelens elektriske holdfasthet og levetid. Tidligere arbeider har vist at denne aldringsmekanismen akselereres av mekaniske påkjenninger, som bøyning og strekking av kabelen. Virkningen av dynamiske krefter og eventuelt bidrag fra innefrosne mekaniske spenninger er imidlertid lite undersøkt.

Behovet for mer kunnskap om dette er aktualisert i forbindelse med design av såkalte dynamiske høyspenningskabler. Dette er fritthengende sjøkabler som brukes for nett-tilkobling av for eksempel offshore vindmøller og andre flytende havinstallasjoner, hvor de utsettes for dynamiske bølgebevegelser.

Hovedformålet med denne masteroppgaven er eksperimentelt å undersøke hvordan vanntrevekst i PEX kabelisolasjon påvirkes av statisk og dynamisk mekanisk belastning samt indre mekaniske spenninger fra produksjonsprosessen.

Oppgavens elementer:

1. På bakgrunn av eksisterende litteratur, skal det gis en oversikt over hva som tidligere er observert vedrørende mekanisk påkjenning, samt teorier for sammenhengen mellom mekanisk påkjenning og vanntrevekst.
2. Det skal gjøres rede for hvor store mekaniske spenninger isolasjonen i en dynamisk kabel vil kunne bli utsatt for, og virkningen av kabelens produksjonsprosess.
3. I tråd med dette skal det utvikles egnet metodikk og prøve prosedyrer for gjennomføring av vanntrealdring av mekanisk påkjente 12 kV PEX kabelobjekter, samt tilhørende referanse objekter.

4. Etter aldringen skal isolasjonen karakteriseres med hensyn på maksimal lengde, romlig fordeling og tetthet av ulike typer vanntrær.
5. Vurdere resultatene i lys av foreslåtte hypoteser og aldringsmekanismer.

Omfanget og detaljene i arbeidet avtales med veileder underveis.

Oppgaven gitt: 11. januar 2013
Besvarelsen leveres innen : 11. juni 2013

Faglærer: Prof. Erling Ildstad Erling.Ildstad@elkraft.ntnu.no
Veileder: Senior forsker Hallvard Faremo hallvard.faremo@sintef.no

Trondheim 30/4-13.

Faglærer

Forord

Denne oppgaven er en avsluttende masterutredning ved Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet i sivilingeniørstudiet Energi og miljø med fordypning i Elektrisk Energiteknikk. Oppgavetittelen er: Virkning av mekanisk spenning på vanntrevekst i PEX isolerte høyspentkabler.

Masteroppgaven er en del av et større prosjekt om dynamiske sjøkabler ved NTNU/SINTEF Energi AS. Prosjektet er sponset av Norges forskningsråd og gjennomføres i nært samarbeid med aktører i industrien.

Temaet i oppgaven er relatert til problematikken rundt dynamiske sjøkabler og hvorvidt mekanisk belastning påvirker vanntrevekst. Det vil også studeres om indre mekaniske spenninger som dannes i ekstruderte kabler under produksjonsprosessen påvirker veksten. Dette vil være av interesse ettersom vanntrevekst kan redusere levetiden til polymerisolerte kabler.

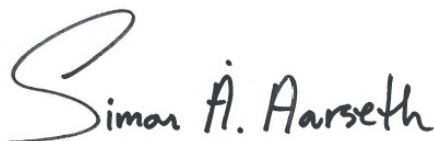
Gjennomføringen av masteroppgaven krevde mye engasjement og gode praktiske ferdigheter, da store deler av oppgaven bestod av praktisk arbeid i laboratoriet.

Jeg ønsker å takke professor Erling Ildstad og seniorforsker Hallvard Faremo for god veiledning og hjelp med det teoretiske og praktiske under arbeidet med oppgaven.

Jeg vil også takke avdelingsingeniør Bård Almås ved instituttet for elektrisk elkraftteknikk ved NTNU for opplæring og hjelp ved montering av tekniske installasjoner.

Det rettes også en takk til det tekniske verkstedet ved elkraftteknikk for utvikling og montering av mekaniske deler til eksperimentene.

Trondheim juni 2013



Simon Årdal Aarseth

Sammendrag

Vantrær er en nedbrytningsmekanisme som kan oppstå i alle polymerisolerte kabler ved interaksjon mellom fuktighet og et elektrisk felt. Polymerisolerte kabler kan få redusert levetid grunnet dette nedbrytningsfenomenet. Den siste tiden har et økt miljøfokus ført til en elektrifisering av flytende olje- og gassinstallasjoner, samt økt satsing på flytende vindturbiner offshore. Kabler som benyttes til slike formål blir utsatt for både statiske og dynamiske krefter. Det har i denne oppgaven blitt undersøkt hvordan mekanisk belastning påvirker vanntreksten, da særlig dynamisk mekanisk strekk. Det har også blitt undersøkt om de innfryste strekk- og kompresjonskrefter som dannes under produksjonsprosessen får betydning for vanntreksten.

Det ble gjennomført 9 forsøk med samme type 12 kV trippelstrudert PEX-kabel, hvor 3 av disse ble gjennomført høsten 2012 i forbindelse med prosjektoppgaven. Kablene ble påtrykt 50 Hz AC-spenning hvor $U = 2U_0$, men det ble også gjort ett forsøk med 25 kV spenning. Samtlige kabler benyttet i eksperimentene ble aldret ved romtemperatur med vann både i og utenfor kabelisolasjonen. I forsøkene ble kabler uten leder utsatt for statisk og dynamisk mekanisk belastning med strekkprosent, $\epsilon = 1\%$. Kabler ble belastet med ulik dynamisk mekanisk belastning ved å benytte to motorer med ulik rotasjonsfrekvens. Det ble også gjort forsøk uten mekanisk belastning. I det ene av disse forsøkene ble en kabel uten kobberleder varmebehandlet ved 120 °C og deretter nedkjølt gradvis til romtemperatur. Det ble også gjort forsøk med lederen beholdt i kabelen.

Etter endt aldring ble kablene snittet opp og innfarget før vanntreksten ble dokumentert ved mikroskopanalyse. Alle ventilerte vantrær ble registrert med tilhørende lengde. For bow-tie trær ble det lagt særlig stor vekt på registreringen av det lengste treet i hvert snitt.

Resultatene dokumenterer at forekomsten av ventilerte vantrær ved den indre halvlederen er 3-5 ganger større og at den gjennomsnittlige lengden er 27,3 - 32,8% større i de mekanisk belastede kablene sammenlignet med ubelastet kabel. Den mekaniske belastningen er funnet å ikke påvirke forekomsten av ventilerte vantrær ved den ytre halvlederen og tettheten av bow-tie trær i det ytre isolasjonsområdet. Innfryste kompresjonskrefter i den ytre delen av isolasjonen antas å hindre vanntreksten, selv om kablene belastes med strekk.

Det er dokumentert at innfryste strekk- og kompresjonskrefter er den dominante effekten som gir høy vanntrekst i det indre isolasjonsområdet og lav vanntrekst i det ytre isolasjonsområdet.

Forsøk viser at det kan ha blitt fjernet strekkrefter på mer enn 5,6% i aksial retning for en varmebehandlet kabel. Den mekaniske avspenningen med varmebehandling indikerer at det må ha blitt dannet strekkrefter som er i størrelsesorden med fjernet strekk under produksjonsprosessen. Det er dokumentert at forekomsten av ventilerte vantrær ved indre halvleder er 5 til 10 ganger større i en PEX-kabel med lederen beholdt sammenlignet med mekanisk avspente kabler. Grunnet innfryste strekkrefter er forekomsten like stor eller større sammenlignet med kabler utsatt for eksternt påført mekanisk strekk.

Resultater fra forsøk med dynamisk mekanisk belastning gir grunnlag for å anta at en økt frekvens på den dynamiske belastningen ikke øker vanntreksten.

Abstract

Water treeing is an aging mechanism which can occur in all polymer insulated cables by interaction between moisture and an electric field. Polymeric insulated cables may reduce lifetime due to this aging phenomenon. Recently, an increased focus on the environment led to the electrification of floating oil and gas installations, and increased focus on floating wind turbines offshore. Cables used for such purposes are subjected to both static and dynamic stress. The aim of this report has been to investigate how mechanical stress affects water tree growth, with main focus on dynamic mechanical strain. It has also been studied how the frozen-in mechanical tensile and compressive stresses, generated in the extruded insulation during the manufacturing process, will affect the water tree growth.

Nine experiments with the same type of 12 kV XLPE cable has been conducted, where three were conducted in autumn 2012. The cables were applied 50 Hz AC voltage $U = 2U_0$, except from one cable sample that was subjected to 25 kV voltage. All cables used in the experiments were aged at room temperature with water both inside and outside cable insulation. Cable samples were mechanically stretched at 1% in the experiments, using both static and dynamic mechanical load varying at 0,1 and 1,0 Hz. It was also made various experiments without mechanical strain. A cable without copper conductor was subjected to thermal treatment at 120 °C and cooled slowly to room temperature after treatment. It was also done experiments with the copper conductor kept in the insulation.

The cable samples were sliced up and colored after aging, and the water trees were documented by microscopic analysis. All vented water trees were documented with associated length. For bow-tie trees there was laid special emphasis on the registration of the longest tree in each section.

The results document that the density of vented water trees at the inner semiconductor is 3-5 times larger and that the average length is 27,3 - 32,8 % larger in the mechanical stressed cables compared with an unloaded cable. The mechanical load is found not to affect the density of vented water trees at the outer semiconductor and the density of bow-tie trees in the outer insulation area. Frozen-in mechanical compressive stresses at the outer insulation surface may balance the effect of applied strain.

There is found that frozen-in tensile and compressive stresses are the dominant effect that enhance the water tree growth at the inner insulation surface and gives lower growth at the outer surface.

In addition thermal treatment indicated a total residual longitudinal mechanical strain of 5,6%, frozen in during the manufacturing process. There is found that the density of vented water trees at the inner semiconductor is 5 to 10 times larger in a cable with conductor compared to a mechanically relaxed cables. Due to the frozen-in strain the density of vented water trees is equal to or larger compared with cables exposed to external mechanical stress.

Results from dynamic mechanical experiments gives reason to assume that an increased frequency of the dynamic load not increases the water tree growth.

Innhold

1	Introduksjon	1
1.1	Formål	1
1.2	Bakgrunn	1
1.2.1	Flytende offshore installasjoner	1
1.2.2	Dynamiske kabler	3
1.3	Arbeidsomfanget til studiet	4
1.4	Hypotese	5
2	Teori	7
2.1	Historie	7
2.2	Initiering og vekst av vanntreer	7
2.3	Virkningen av mekanisk påkjenning på vanntrevekst i PEX- kabler	10
2.4	Innfryste krefter i ekstrudert kabelisolasjon	10
2.5	Diffundering av vann i polymerer	11
3	Metodikk	12
3.1	Prøveobjektet	12
3.2	Metodeutførelse	13
3.2.1	Mekanisk testtrigg	13
3.2.2	Kabelisolasjonens strekkprosent	13
3.2.3	Fremstilling av kabelobjekter	14
3.2.4	Statisk mekanisk belastning av kabler	17
3.2.5	Dynamisk mekanisk belastning av kabler	18
3.2.6	Kabelobjekt uten mekanisk påkjenning	21
3.2.7	Elektrisk oppkobling	22
3.2.8	Vanntreanalyse	25
4	Resultater	30
4.1	Måling av PEX-isolasjonens krymping	30
4.2	Resultater fra forsøk med ubelastede kabler	31
4.2.1	Fordeling og forekomst av vanntreer i isolasjonen	31
4.2.2	Gjennomsnittlig lengde av ventilerte vanntreer	33
4.2.3	Gjennomsnittlig maksimal lengde av bow-tie trær	34
4.2.4	Estimerte verdier av maksimal lengde av bow-tie trær	35
4.2.5	Sammenligning av vanntrevekst ved indre og ytre halvleder	36
4.3	Resultater fra forsøk med mekanisk belastning	36
4.3.1	Vanntrevekst i statisk og dynamisk mekanisk be- lastede kabler sammenlignet med ubelastede	37

4.3.2	Sammenligning av vanntrevekst i dynamisk mekanisk belastede kabler aldret ved ulike frekvens	40
4.3.3	Fordelingen av bow-tie trær i isolasjonen for dynamisk mekanisk belastede kabler aldret i 4 uker	42
4.3.4	Estimerte verdier av maksimal lengde av bow-tie trær	43
4.4	Lengste vanntreet i den analyserte isolasjonslengden	44
4.5	Feilkilder	45
5	Diskusjon	46
5.1	Ubelastede kabler	46
5.1.1	Innfryste krefters påvirkning på vanntreveskten	46
5.2	Statisk og dynamisk mekanisk belastede kabler	48
5.2.1	Statisk og dynamisk mekanisk belastede kabler sammenlignet med ubelastede	48
5.2.2	Dynamisk mekanisk belastning av kabler sammenlignet med statisk mekanisk belastning	49
5.2.3	Dynamisk mekanisk belastede kabler aldret ved ulike frekvens	49
5.3	Lengste vanntre	50
5.3.1	Estimerte verdier av maksimal lengde av Bow-tie trær	51
6	Konklusjon	52
7	Forslag til videre arbeid	53
A Verdier fra mikroskopanalysen		56
B Elektrisk feltfordeling i kabler		59
C Ekstremalverdistatistikk		60
1	Ekstrapolering	61
2	Beregning av parametere	61
D Plott av sannsynlighetsfordeling		64
1	Ubelastede kabler	64
2	Mekanisk belastede kabler	66
E Bilder av de lengste vanntreene i hvert kabelobjekt		69
1	Referansekablene	69
2	Mekanisk belastede kabler	70

Figurer

1.1	Årlig gjennomsnittlig vindhastighet over det europeiske kontinentet	1
1.2	Illustrasjon av flytende offshore installasjoner	2
1.3	Dynamisk kabeldesign for Gjøa	4
1.4	Typisk spenningkurve for kobber. Kurven kan fås ved å gjennomføre en strekktest på metallet med et sylindrisk strekkobjekt	5
2.1	Illustrasjon av den mekaniske modellen for initiering og vekst av vanntrær i en sprekkdannelse[15]	7
2.2	Illustrasjon av de ulike vanntreypene[17]	9
2.3	Typisk vekstrate for vanntrær[8]	9
2.4	Endring i spesifikt volum for PEX ved nedkjøling fra produksjonstemperatur til romtemperatur (a) og innfryste strekkrefter i en 66 kV PEX-kabel som funksjon av temperatur, negativt fortegn betegner kompresjonskrefter[21] (b)	11
3.1	Illustrasjon av kabelen som er benyttet i forsøkene[17]	12
3.2	Kabelens tverrsnitt[17]	12
3.3	Den mekaniske testtriggen som brukes i forsøkene[14]	13
3.4	Prosedyren for uttrekking av lederen	15
3.5	Festepunkt med leder[17]	16
3.6	Festepunkt med hult stålrør i lederkanalen[17]	16
3.7	Vannrør med mulighet for gjennomstrømning	16
3.8	Vanntett forsegling som festes i messinghylsene og holder kabelobjektene i plastrøret	17
3.9	Statisk mekanisk oppsett på den mekaniske testtriggen	18
3.10	Drivsystemet for motoren med frekvens på 0,1 Hz	19
3.11	Skisse av plasseringen til den eksentriske bolten og det totale bevegelsesutslaget på 1 cm	19
3.12	Drivsystemet for dynamisk strekk av kabelobjekter	20
3.13	Staget som overfører den dynamiske bevegelsen til kabelobjektene	21
3.14	Stresskoner og plastrør for vannfylling i lederkanalen	23
3.15	Elektrisk oppkobling for spenningspåkjenning	24
3.16	Spiralisert isolasjon klar til innfarging	25
3.17	Et snitt studeres i mikroskopet etter innfarging	27
3.18	Isolasjonens soneinndeling	27
4.1	PEX-isolasjonens aksielle krymping som funksjon av temperatur ved startlengder på 49.4 cm (a) og 99.4 cm (b) ved nedkjøling fra 120 °C	31
4.2	Prosentvis fordeling og tettheten per volumenhet isolasjon av bow-tie trær i kabler aldret i 3 uker uten mekanisk belastning	32

4.3	Forekomsten av ventilerte vanntrær per arealenhet isolasjon (a) og tettheten av bow-tie trær per volumenhet isolasjon (b) for ubelastede kabler aldret i 3 uker	33
4.4	Gjennomsnittlig lengde av ventilerte vanntrær for ubelastede kabler aldret i 3 uker	34
4.5	Gjennomsnittlig maksimal lengde av bow-tie trær for ubelastede kabler aldret i 3 uker	35
4.6	Forekomst av ventilerte vanntrær per arealenhet ved indre og ytre halvleder for kabelobjekt med leder aldret i 3 uker ved ulike spenning	36
4.7	Forekomsten av ventilerte vanntrær per arealenhet (a) og tettheten av bow-tie trær per volumenhet (b) etter 3 uker aldret . . .	38
4.8	Gjennomsnittlig lengde av ventilerte vanntrær i kabler aldret i 3 uker	39
4.9	Gjennomsnittlig maksimal lengde per 5 mm isolasjonslengde av bow-tie trær i kabler aldret i 3 uker	40
4.10	Forekomst av ventilerte vanntrær per arealenhet isolasjon (a) og tetthet av bow-tie trær per volumenhet isolasjon (b) i kabler aldret med 0,1 og 1,0 Hz dynamisk mekanisk belastning i 3 og 4 uker	41
4.11	Gjennomsnittlig lengde av ventilerte vanntrær (a) og gjennomsnittlig maksimal lengde av bow-tie trær (b) i kabler aldret med 0,1 og 1,0 Hz dynamisk mekanisk belastning i 3 og 4 uker	42
4.12	Tettheten av bow-tie trær per volumenhet i de 3 inndelte isolasjonsområdene for kabler aldret i 4 uker med 0,1 og 1,0 Hz dynamisk mekanisk belastning	43
4.13	Lengste vanntrær funnet i den analyserte isolasjonslengden . . .	44
4.14	Lengste ventilerte vanntrær og bow-tie tre i den analyserte isolasjonslengden	45
2.1	Grafisk fremstilling av verdiene i Tabell C.1 plottet i EXCEL. Y-aksen angir sannsynligheten fra 0 til 1, og x-aksen angir lengden av vanntrær i mikrometer	63
1.1	Kumulativ sannsynlighetsfordeling av maksimal lengde av bow-tie trær for referansekabel uten leder aldret i 3 uker. $n=16$, hvor lengden per prøve er 0,25 cm. $L_0=0,04$ m, $v=118$, $x=150$, $W(x)=0,64$, $\beta=116,7$	64
1.2	Kumulativ sannsynlighetsfordeling av maksimal lengde av bow-tie trær for referansekabel med leder aldret i 3 uker. $n=12$, hvor lengden per prøve er 0,5 cm. $L_0=0,06$ m, $v=125,2$, $x=150$, $W(x)=0,74$, $\beta=220,7$	65
1.3	Kumulativ sannsynlighetsfordeling av maksimal lengde av bow-tie trær for varmebehandlet kabel uten leder aldret i 3 uker. $n=8$, hvor lengden per prøve er 0,5 cm. $L_0=0,04$ m, $v=133$, $x=190$, $W(x)=0,78$, $\beta=105,7$	65
2.1	Kumulativ sannsynlighetsfordeling av maksimal lengde av bow-tie trær for statisk mekanisk belastet kabel aldret i 3 uker. $n=8$, hvor lengden per prøve er 0,5 cm. $L_0=0,04$ m, $v=124$, $x=160$, $W(x)=0,46$, $\beta=194,9$	66

2.2	Kumulativ sannsynlighetsfordeling av maksimal lengde av bow-tie trær for dynamisk $f=0,1$ Hz mekanisk belastet kabel aldret i 3 uker. $n=8$, hvor lengden per prøve er 0,5 cm. $L_0=0,04$ m, $v=123,9$, $x=170$, $W(x)=0,9$, $\beta=225,4$	66
2.3	Kumulativ sannsynlighetsfordeling av maksimal lengde av bow-tie trær for dynamisk $f=1,0$ Hz mekanisk belastet kabel aldret i 3 uker. $n=14$, hvor lengden per prøve er 0,5 cm. $L_0=0,07$ m, $v=113,8$, $x=160$, $W(x)=0,71$, $\beta=107,2$	67
2.4	Kumulativ sannsynlighetsfordeling av maksimal lengde av bow-tie trær for dynamisk $f=0,1$ Hz mekanisk belastet kabel aldret i 4 uker. $n=14$, hvor lengden per prøve er 0,5 cm. $L_0=0,07$ m, $v=123,7$, $x=140$, $W(x)=0,71$, $\beta=69$	67
2.5	Kumulativ sannsynlighetsfordeling av maksimal lengde av bow-tie trær for dynamisk $f=1,0$ Hz mekanisk belastet kabel aldret i 4 uker. $n=14$, hvor lengden per prøve er 0,5 cm. $L_0=0,07$ m, $v=120,2$, $x=160$, $W(x)=0,85$, $\beta=204,4$	68
1.1	Ventilert vanntre ved indre halvleder (a), bow-tie tre (b) og ventilert vanntre ved ytre halvleder (c) i referansekabel med leder . .	69
1.2	Ventilert vanntre ved indre halvleder (a), bow-tie tre (b) og ventilert vanntre ved ytre halvleder (c) i referansekabel uten leder . .	70
2.1	Ventilert vanntre ved indre halvleder (a), bow-tie tre (b) og ventilert vanntre ved ytre halvleder (c) i statisk mekanisk belastet kabel	70
2.2	Ventilert vanntre fra indre halvleder (a), bow-tie tre (b) og ventilert vanntre fra ytre halvleder (c) i 0,1 Hz dynamisk mekanisk belastet kabel	70
2.3	Ventilert vanntre fra indre halvleder (a) og bow-tie tre (b) i 1.0 Hz dynamisk mekanisk belastet kabel	71
2.4	Ventilert vanntre fra indre halvleder (a), bow-tie tre (b) og ventilert vanntre fra ytre halvleder (c) i 0,1 Hz dynamisk mekanisk belastet kabel aldret i 4 uker	71
2.5	Ventilert vanntre fra indre halvleder (a) og bow-tie tre (b) i 1.0 Hz dynamisk mekanisk belastet kabel aldret i 4 uker	72

Tabeller

1	Ingredienser og tilhørende mengde for å lage metylenblått	26
2	Oppskrift for innfargingsprosessen	26
3	Målt kabellengde etter uttrekking av kobberlederen med startlengder på 0,5 og 1,0 m	30
4	Analysert kabellengde for ubelastede kabler	31
5	Parametere beregnet fra sannsynlighetsfordelingen i ligning 7 og korresponderende 5%, 50% og 95% sannsynlighet for at den maksimale lengden til bow-tie trær i en 1 meter lang kabel overstiger den gitte verdien av l_{max} for ubelastede kabler	35
6	Analysert isolasjonslengde for mekanisk belastede kabler	37
7	Parametere beregnet fra sannsynlighetsfordelingen i ligning 7 og korresponderende 5%, 50% og 95% sannsynlighet for at den maksimale lengden av bow-tie trær i en 1 meter lang kabel overstiger den gitte verdien av l_{max} for mekanisk belastede kabler	43
A.1	Analysert isolasjonslengde for ventilerte vanntrær og bow-tie trær	56
A.2	Forekomst og gjennomsnittlig lengde av ventilerte vanntrær i ubelastede kabler	57
A.3	Forekomst og gjennomsnittlig lengde av ventilerte vanntrær i mekanisk belastede kabler	57
A.4	Forekomst og gjennomsnittlig maksimal lengde av bow-tie trær i ubelastede kabler	58
A.5	Forekomst og gjennomsnittlig maksimal lengde av bow-tie trær i mekanisk belastede kabler	58
A.6	PEX-isolasjonens krymping ved nedkjøling fra 120 °C	58
C.1	Venstre tabell viser det lengste bow-tie treet i hver prøve. Høyre tabell viser beregning av sannsynlighet ved hjelp av formel C.5	62

1 Introduksjon

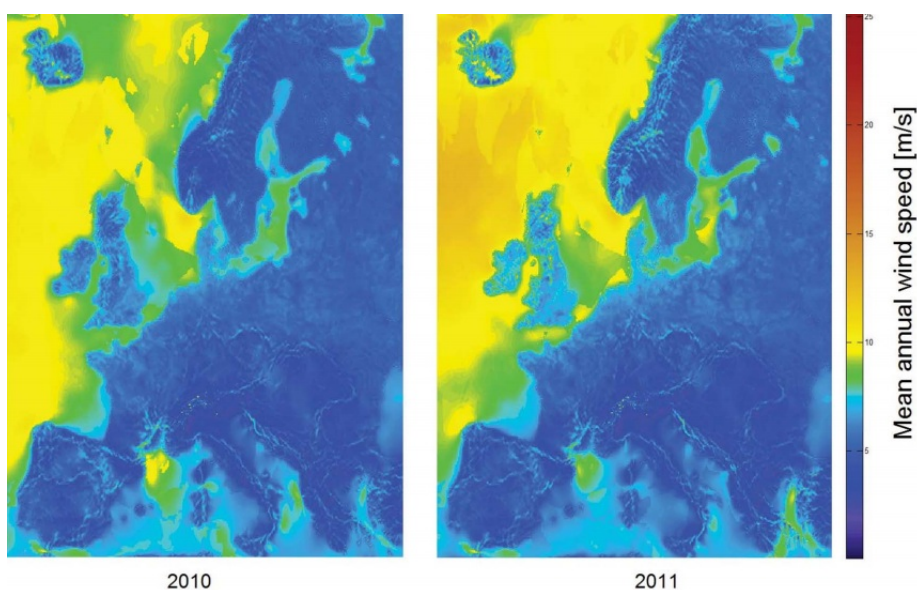
1.1 Formål

Formålet med denne oppgaven er å studere vanntrevekst i PEX-isolerte kabler utsatt for statisk og dynamisk mekanisk strekk, samt studere hvorvidt indre mekaniske spenninger fra produksjonsprosessen påvirker veksten.

1.2 Bakgrunn

Polymerisolerte kabler som utsettes for fuktighet og et elektrisk felt kan få redusert levetid grunnet vanntredannelse i isolasjonen[1]. Tidligere studier har vist at mekanisk strekk akselererer vanntreveksten i isolasjonen. Kabler som benyttes til å koble flytende offshore installasjoner til strømmettet blir gjerne utsatt for store statiske og dynamiske krefter. Flytende vindmølleparker blir nødvendig dersom vindkraftpotensialet offshore skal utnyttes. Det er også igangsatt en elektrifisering av olje- og gassinstallasjoner de siste årene, og noen av disse plattformene er flytende.

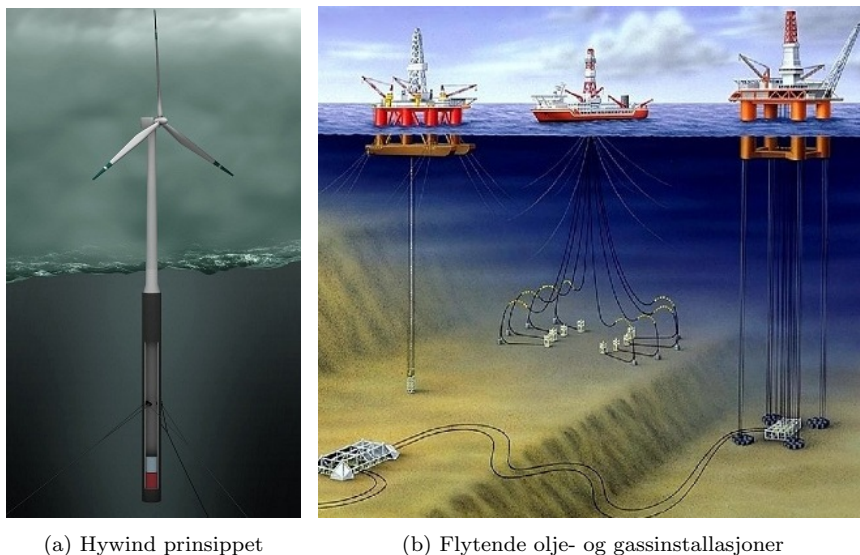
1.2.1 Flytende offshore installasjoner



Figur 1.1: Årlig gjennomsnittlig vindhastighet over det europeiske kontinentet

Ved å bygge vindparker offshore reduseres problematikken knyttet til støy og visuell forurensning. Det er også en stor fordel å flytte vindturbinene offshore med tanke på vindpotensialet. Figur 1.1 viser at det er spesielt gode vindforhold langs sørkysten av Norge. Det kommer også frem at det er havområder vest for Storbritannia med svært gode vindforhold. Havvindparker blir i dag bygget på

steder hvor fundamentet vindmøllene står på kan festes til havbunnen. Det er dermed begrenset hvor dypt det kan være der anleggene plasseres. Dogger Bank er en grunne utenfor Yorkshire i nord England, hvor vanddyptet varierer mellom 18 og 63 meter. Her planlegger Forewind å bygge en vindpark med kapasitet på hele 9GW[2]. Geografiske områder med slike grunner som Dogger Bank er begrenset, og dersom vindmøller skal bygges på dypere steder må konstruksjonene være flytende. Teknologien som skal til for å lage flytende vindmøller i dypvannsområder finnes. Utenfor sørvestkysten av Norge prøver Statoil ut Hywind, som var verdens første flytende vindturbin. Den ble installert i 2010 med en effekt på 2,3MW[3]. Konstruksjonen består av en stålsylinder fylt med ballast av vann og steiner. Den stikker 100 meter under havoverflaten, og er festet til havbunnen med tre anker, se Figur 1.2a. Statoil har gjennom Hywind-prosjektet fått oppsiktsvekkende resultater. Vindturbinen produserte hele 10,1 GWh i fjor, noe som tilsvarer en kapasitetsfaktor på 50 prosent. Dette er langt høyere enn vindturbinene på land[4]. Dersom slike havvindkonsepter får konkurransedyktige kostnader kan en nyttiggjøre potensialet i offshore vindkraft.



Figur 1.2: Illustrasjon av flytende offshore installasjoner

Flytende olje- og gassinstallasjoner brukes på store havdyp eller på steder hvor det er kontinuerlig behov for å forflytte installasjonen ved boring. Det finnes i hovedsak tre forskjellige typer flytende plattformer. I Figur 1.2b ser en fra venstre den halvt nedsenkbare oljeplattformen (Semisubmersible Rig), bore- og produksjonsskip og strekkstagplattform (Tension Leg Platform). Bruksområdet til de ulike plattformene er avhengig av vanddybden og størrelsen på olje- eller gassreservoaret. Plattformene kan bli satt i kraftig bevegelse av bølge- og vindkrefter.

Gjøa var verdens første flytende plattform til å få strømtilførsel fra fastlandet i 2010. Statoil regnet med at dette vil redusere karbondioksid utslippet med 210 000 tonn i året. Strømkabelen ble levert av ABB og var verdens lengste dynamiske vekselstrøm-kabel til en flytende installasjon[5]. Kabelen kan levere

40 MW og har en spenning på 90 kV. Den består av en 98,5 km statisk PEX-isolert kabel, og en 1,5 km dynamisk PEX-isolert kabel. Plattformen kan bevege seg så mye som 75 meter i hvilken som helst retning, og det var derfor store teknologiske utfordringer knyttet til den dynamiske kabelen.

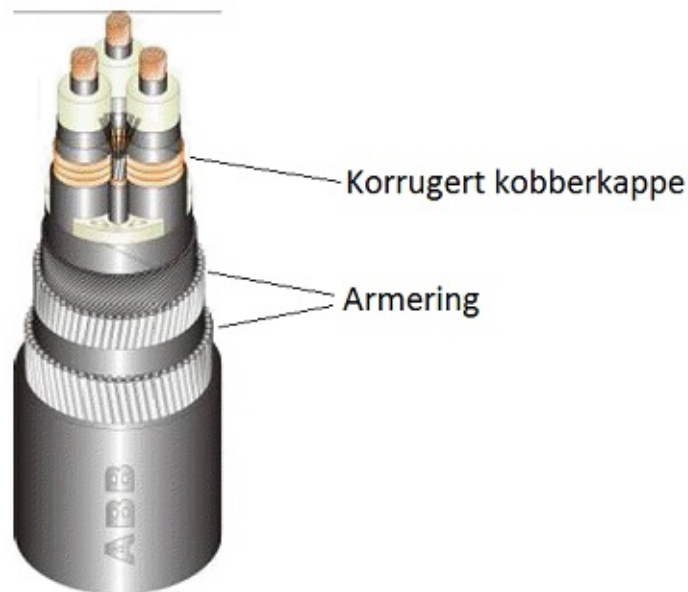
1.2.2 Dynamiske kabler

Ved offshore installasjoner som er beskrevet må det tas i bruk en dynamisk sjøkabel fra havbunnen og opp til den flytende konstruksjonen. Den dynamiske sjøkabelen knytter den flytende installasjonen til en statisk kabel som ligger på havbunnen, og som går videre inn til land. For å unngå vannredannelse i kabelen er det viktig å holde isolasjonen tørr. Risikoen for å få vannredannelse øker jo høyere spenningen er, ettersom det elektriske feltet som er en forutsetning for vanntrevekst øker med spenningen. Tradisjonelt sett gjøres kabelen vannrett med en beskyttende blykappe. Problemet er at en slik blykappe vil slå sprekker hvis den utsettes for mye bevegelse. Kabelens levetid kan bli betydelig redusert som følge av dette. En av hovedutfordringene til ABB i utviklingen av den dynamiske kabelen til Gjøa prosjektet var derfor å gjøre isolasjonen vannrett. Grunnet den høye vekselspenningen, 90 kV, var det absolutt nødvendig å beskytte isolasjonen mot vanninntregning. Det ble derfor utviklet et design med en korrugert kobberkappe, som med sin bølgete form er mer fleksibel enn den tradisjonelle blykappa. Kabelen vil i følge ABB ha en forventet levetid på minst 35 år[5].

For å beskytte kabler mot strekkrefter brukes armering. Dynamiske kabler har gjerne flere lag med armering, hvor det ytterste laget er størst. Armeringen legges rundt kabelen som en spiral. Dersom kabelen skal ha flere lag med armering legges spiralene i motsatt retning for å kompensere for hverandre. Kobber og galvanisert stål blir ofte brukt som armering.

Offshore PEX-isolerte kabler i mellomspenningssjiktet opp til 36 kV blir normalt laget uten vannbeskyttende blykappe. Denne type kabel brukes blandt annet for å knytte de individuelle turbinene i vindparken til hverandre. Vannredannelse vil bli et problem i disse kablene over tid.

Figur 1.3 viser den dynamiske kabelen til Gjøa plattformen. Den korrugerte kobberkappa er lagt rundt hver enkelt fase. Det er brukt to lag med armering for å gi kabelen styrke.



Figur 1.3: Dynamisk kabeldesign for Gjøa

1.3 Arbeidsomfanget til studiet

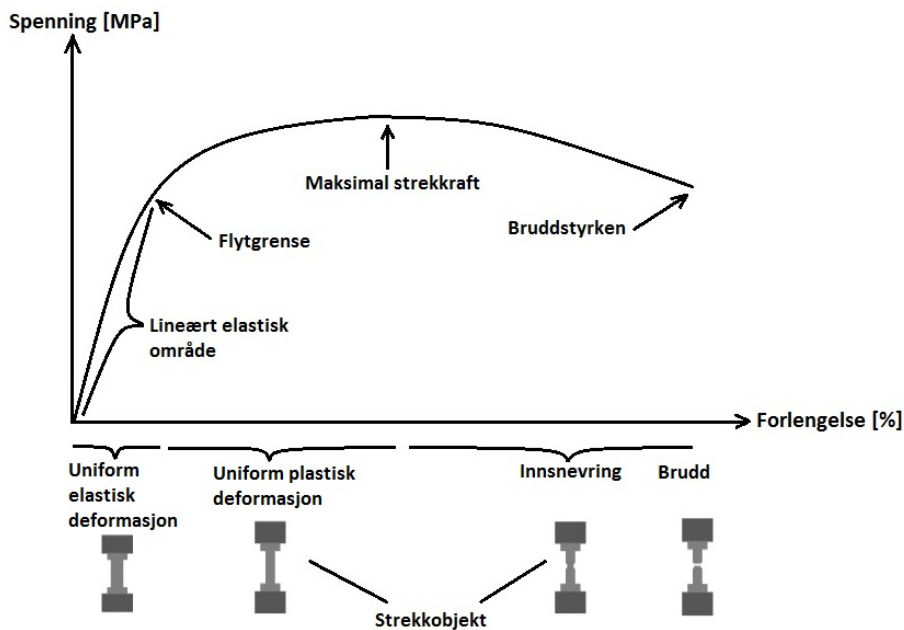
Det er i arbeidet med denne oppgaven gjennomført seks ulike forsøk med samme type 12 kV tripplekstruderte PEX-kabel. I alle forsøkene blir kablene aldri ved romtemperatur og med vann både i og utenfor kabelisolasjonen. Det er i de første forsøkene tatt i bruk en mekanisk testtrigg for å belaste kablene med dynamisk mekanisk strekk på 1%. To motorer med en omdreingsfrekvens på henholdsvis 0,1 og 1,0 Hz påfører kablene vertikalt strekk i de dynamiske forsøkene. Det er gjennomført forsøk med statisk mekanisk belastning i prosjektoppgaven høsten 2012 som er med i sammenligninger. Kobberlederen er fjernet fra PEX-isolasjonen i de mekaniske eksperimentene, slik at kun isolasjonen utsettes for mekanisk strekk. Kablene på den mekaniske testtriggen aldri i henholdsvis 3 og 4 uker og påtrykkes to ganger kabelens driftsspenning, $U = 2U_0 = 13,85$ kV. Det er også gjort forsøk med kabler uten mekanisk belastning, ett hvor kobberlederen er trukket ut og to hvor ledere er beholdt. I det ene forsøket med ledere beholdt er kabelen utsatt for en høyere spenning, 25 kV, enn kablene på den mekaniske testtriggen. Det gjøres også et forsøk hvor et varmeskap benyttes til å varme opp en PEX-kabel uten leder til 120 °C i 2 døgn, for deretter å nedkjøle kabelen gradvis til romtemperatur. Alle de mekanisk ubelastede kablene aldri i 3 uker.

Etter endt aldringstid ble kabelisolasjonen snittet opp og analysert for vanntrær i mikroskop.

1.4 Hypotese

Tidligere forsøk har vist at initiering og vekst av vanntrær lar seg påvirke av mekaniske krefter på polymerisolasjonen. Det er funnet at kompresjonskrefter reduserer vanntreveksten, mens strekkrefter akselererer vanntreveksten[13]. Når en kabel blir utsatt for fuktighet og et alternerende elektrisk felt, kan Maxwell-krefter virke i små hulrom og sprekker i isolasjonen, se teori 2.2. Det antas at strekkrefter legges til Maxwell-kreftene og resulterer i økt påkjenning.

Både kobber og PEX-isolasjon har en definert flytgrense. Med flytgrense menes det punktet på spenningskurven hvor en økning i kraft ikke lenger er proporsjonal med økt strekk. Hvis påført spenning(strekkraft) øker over denne flytgrensen, får ikke legemet tilbake sin opprinnelige form etter at spenningen opphører. Dersom metallet eller PEX-isolasjonen strekkes over flytgrensen vil materialet få en varig forlengelse. Videre kraftpåkjenning vil til slutt føre til at materialet bryter sammen. PEX-isolasjon har en flytgrense på rundt 9% ved en temperatur på 30°C[14]. For kobber er den definerte flytgrensen på 0,2%, men spenningskurven kan avvike fra linearitet under 0,1%. Flytgrensen for kobberledere vil variere med arealet av tverrsnittet, og Nexans har funnet at flytgrensen blir lavere ved økende tverrsnittareal[18].



Figur 1.4: Typisk spenningskurve for kobber. Kurven kan fås ved å gjennomføre en strekktest på metallet med et sylindrisk strekkobjekt

Grunnet de dårlige mekaniske egenskapene til kobberet er det nødvendig å beskytte ledere mot strekkrefter som kan føre til deformasjon. Armeringen i en dynamisk kabel sørger for at strekket i kobberlederens aksielle retning holdes

langt under området for plastisk deformasjon. Ved installasjon av kabel er det ikke lov å utsette en herdet kobberleder for strekkrefter over 50 N/mm^2 [1]. Dette tilsvarer et strekk på mindre enn 0,05% for en kobberleder med et tverrsnitt på 95 mm^2 [18]. Strekkreftene som PEX-isolasjonen vil utsettes for er altså begrenset av kobberet, og det er dermed ønskelig å undersøke virkningen av relativt lave strekkprosenter for mekanisk belastning av PEX.

Ekstruderte kabler vil ha indre mekaniske spenninger lagret i isolasjonen fra produksjonsprosessen. Videre i oppgaven vil de indre mekaniske spenningene omtales som innfryste krefter(eng: frozen-in stress). Innfryste krefter oppstår når den ekstruderte isolasjonen kjøles ned fra utsiden. Teorien i delkapittel 2.4 forklarer at kreftene lagres i kabelisolasjonen grunnet forskjellen i termisk ekspansjonskoeffisient for fast og smeltet polymer, og effekten av at kobberlederen har mye lavere termisk ekspansjonsevne sammenlignet med PEX. Kompresjonskrefter vil lagres i den ytre isolasjonsoverflaten som et resultat av at kabelens overflate blir nedkjølt først og hindrer den indre isolasjonen i å krympe. Interne strekkrefter dannes nær lederen ved nedkjøling, da kobberlederen har mye lavere ekspansjonsevne sammenlignet med PEX, og hindrer den i å krympe til sitt likevektspunkt. Kreftene virker i både aksial og radiell retning. Det er målt verdier for strekkreftene som kan sammenlignes med eller er større enn flytgrensen for polyetylen[14]. På denne måten kan det antas at det vil være brudd i PEX-isolasjonen fra produksjonen som kan føre til at vanntrær lettere kan initieres og vokse.

Det er dokumentert at PEX-kabler utsatt for statisk og dynamisk mekanisk belastning på 1% har større forekomst av og lengre ventilerte vanntrær ved indre halvleder sammenlignet med en ubelastet kabel[19][20]. I disse eksperimentene er kobberlederen trukket ut av PEX-isolasjonen. Det antas at en del av de innfryste strekkreftene nær lederen vil oppheves når lederen fjernes. Lederen vil under produksjonen hindre isolasjonen i å krympe til sitt likevektspunkt, og det antas derfor at isolasjonen vil krympe nærmere sitt likevektspunkt ved fjerning av lederen. Det vil være av interesse å se på vanntreveksten i en ubelastet kabel med lederen beholdt og sammenligne med mekaniske forsøk. De innfryste strekkreftene med lederen beholdt i kabelen antas å være større enn de som påkjennes isolasjonen eksternt.

PEX-isolasjonen vil utvide seg og bli mykere ved økende temperatur. Varm polymerisolasjon som nedkjøles vil krympe. Det antas at dersom en PEX-kabel uten leder varmes opp og deretter nedkjøles gradvis til romtemperatur vil den krympe slik at innfryste krefter som ville blitt dannet som et resultat av rask nedkjøling og lederen uteblir. Det vil være av interesse å registrere kabelisolasjonens aksielle krymping under denne varmebehandlingen. Krympingen kan indikere hvor mye innfryste strekkrefter som fjernes grunnet varmebehandlingen, og på denne måten gi en indikasjon på størrelsen de innfryste strekkreftene som dannes under produksjonsprosessen har. Vanntreveksten i en varmebehandlet kabel forventes derfor å være liten.

Det antas også at kabler aldret med dynamisk mekanisk belastning vil ha større vanntrevekst sammenlignet med kabler aldret med statisk belastning. Det antas at PEX-isolasjonen vil få økt akselerasjon av vanntrevekst når frekvensen på den dynamiske belastningen øker. Slitasjen på isolasjonen forventes å være større ved høyere frekvens og resultere i økt stress.

2 Teori

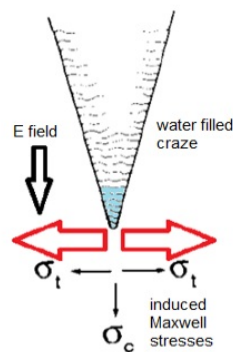
2.1 Historie

I 1969 publiserte japaneren Miyashita oppdagelsen av en nedbrytningsmekanisme i polyetylen (PE) utsatt for fuktighet og elektrisk felt. Dette fenomenet fikk navnet vanntrevekst. Interessen rundt vanntreer var stor ettersom mange ekstruderte kabler uten beskyttelse mot vann feilet i drift[6]. Det ble forsket mye på vanntrevekst fra 1970-tallet og frem til starten av 1990-tallet. Forsknin-gen har avslørt en rekke nøkkelfaktorer. PEX-kablen ble først laget uten ytre halvleder, og resultatet var hyppig vanntrevekst fra den ytre overflaten av PEX-isolasjonen. Det ble i 1978 introdusert en stripbar ytre halvleder som reduserte feilraten betraktelig. Det er funnet at renhet av materialer spiller en viktig rolle, og at forurensninger må unngås[7].

Vanntreer dannes i alle de kjente polymere isolasjoner, og blir derfor i dag sett på som det viktigste aldringsfenomenet i ekstrudert isolasjon[1].

2.2 Initiering og vekst av vanntreer

Vanntreer er et nedbrytningsfenomen som danner treliknende strukturer i polymerisolasjon grunnet fuktighet og AC-spenning. Det er fortsatt ikke enighet om hvordan vanntreer initieres og vokser, selv om forskningsaktiviteten rundt temaet har vært stor de siste 40 årene. Teorien bak initiering og vekst deles normalt inn i to hovedretninger, en mekanisk og en elektrokjemisk[8][9].



Figur 2.1: Illustrasjon av den mekaniske modellen for initiering og vekst av vanntreer i en sprekkdannelse[15]

Den **mekaniske modellen** antar at initiering og vekst av vanntreer starter i små hulrom og sprekkdannelser som kan oppstå i PEX-isolasjonen under ekstruderingsprosessen. Modellen baserer seg på at det dannes en lokal mekanisk overbelastning i sprekkegrunnet Maxwell-krefter og kondensering av vann, illustrert i Figur 2.1. I en sprekkdannelse vil kondensert vann samle seg i spissen, og det oppstår en feltforsterkning. Det vil være Maxwell-krefter i et alternerende elektrisk felt. Ettersom vannmolekylet antas elektrisk ledende, $\epsilon_r \approx 80$, vil Maxwell-kreftene sette vannmolekylene i bevegelse, slik at de støter vinkelrett

mot flatene i sprekken med en pulserende bevegelse. Støtene fra vannmolekylene vil være størst i spissen av sprekken ettersom det er der feltet og Maxwell-kreftene er størst. Kraftene kan være store nok til å bryte opp isolasjonen[10][1].

Størrelsen til Maxwell-kreftene per arealenheter i tuppen av sprekkdannelsen er lik[12]:

$$\sigma = \frac{F}{A} = 1/2(\epsilon_1 - \epsilon_2)(E_{t1}^2 + \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2}E_{n1}) \quad (1)$$

der ϵ_1 og ϵ_2 er permittiviteten til de to materialene og E_{n1} og E_{t1} er normal og tangensiell komponenten til det elektriske feltet i grenseoverflaten. Hvis det antas at den vannfylte sprekken er elektrisk ledende kan kreftene per arealenheter i grenseflaten skrives som:

$$\sigma = 1/2(\epsilon_0\epsilon_r E^2) \quad (2)$$

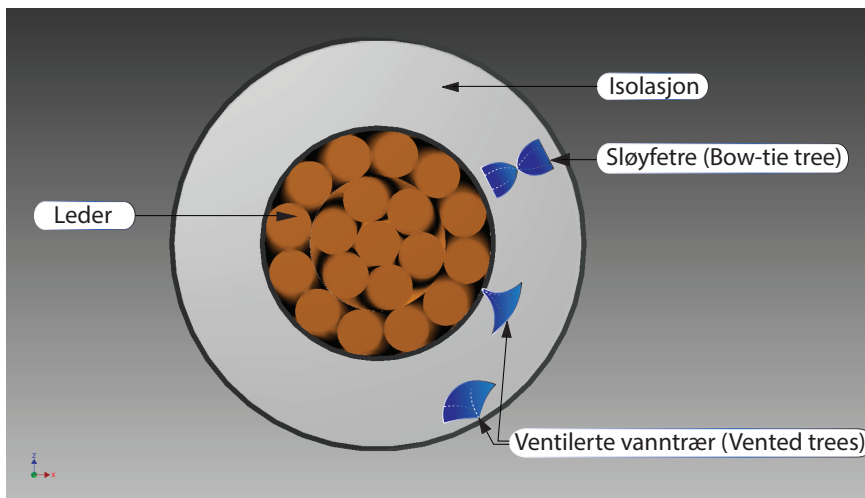
hvor ϵ_0 er vakuumets permittivitet, ϵ_r er den relative permittiviteten og E er den elektriske feltstyrken.

Den **elektrokjemiske modellen** baserer seg på at vekst av vanntrær er et resultat av lokale kjemiske reaksjoner som i stor grad lar seg påvirke av det elektriske feltet. De lokale kjemiske reaksjonene fører til at det dannes trådformede strukturer samtidig som isolasjonen blir mer vanntiltrekkende. Isolasjonen absorberer mer vann ved at det dannes såkalte hydrofile grupper som for eksempel hydroksyl eller karboksyl. De hydrofile gruppene vil tiltrekke mer vann og diffusjon til området øker[9].

Selv om det er uenighet rundt de to modellene for initiering og vekst av vanntrær er det enighet om at det kreves et initieringssted, et alternerende elektrisk felt og relativ fuktighet av vann høyere enn 70 prosent[12].

Elektrisk felt etableres i kabler som påtrykkes spenning. Feltet vil ha retning radielt ut fra indre halvleder og påfører isolasjonen elektrisk stress. Det er observert vanntrevekst i kabler med elektrisk felt mindre enn 1kV/mm[11].

Vanntrær deles ofte inn i to typer: ventilerte vanntrær og sløyfetrær[8]. Figur 2.2 illustrerer de to vanntretypene.

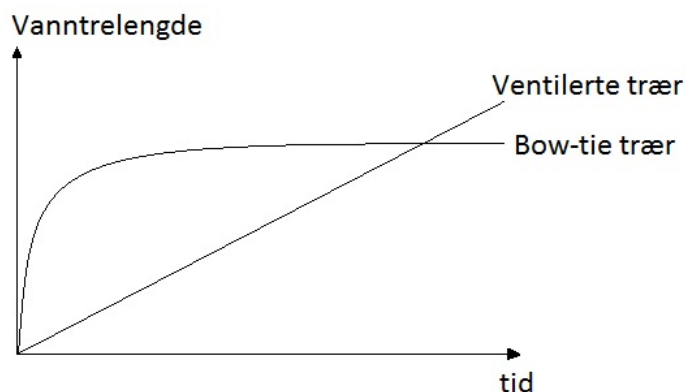


Figur 2.2: Illustrasjon av de ulike vanntretypene[17]

Ventilerte trær (eng: Vented trees) initieres i grenseflaten mellom isolasjonen og halvlederen. Det kan være ujevnheter eller uregelmessigheter i grenseflaten som kan fungere som initieringssted. Vanntreveksten skjer i samme retning som det elektriske feltet. De ventilerte vanntrærne har stabil tilgang på vann. Dette medfører at de ikke slutter å vokse før de har gått igjennom hele isolasjonen og i verste fall fører til gjennomslag. Ventilerte vanntrær er den farlige typen vanntrær.

Sløyfetrær (eng: Bow-tie trees) starter å vokse fra spesifikke lokasjoner som små hulrom eller forurensninger inne i isolasjonen. De vokser som regel symmetrisk i to ulike retninger og har form som en sløyfe. Sløyfetrær vokser raskt i starten, før veksten avtar kraftig etter en stund. Sløyfetrær er derfor sjeldent hovedårsaken til kabelhavari.

Vekstforløpet til de to vanntretypene kan studeres i Figur 2.3.



Figur 2.3: Typisk vekstrate for vanntrær[8]

2.3 Virkningen av mekanisk påkjenning på vanntrevekst i PEX-kabler

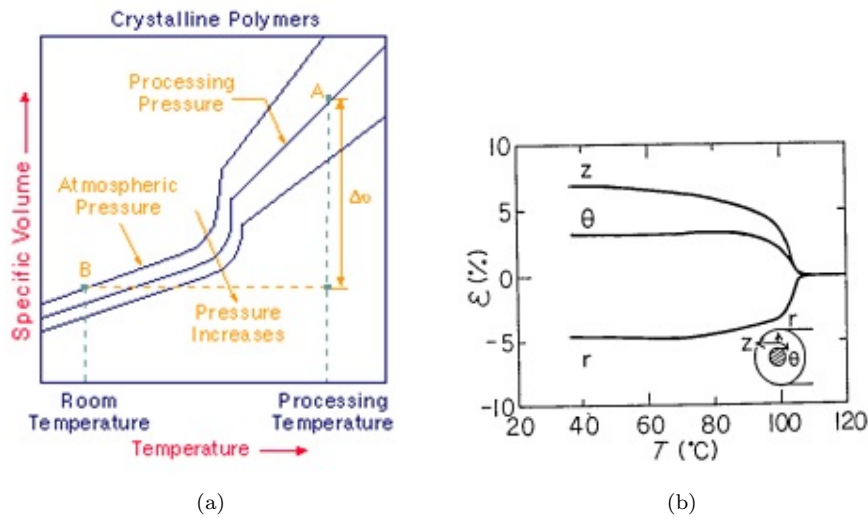
Det har vist seg at vanntrevekst lar seg påvirke av mekaniske krefter på isolasjonen. Det er dokumentert at strekk på isolasjonen akselererer vanntreveksten, mens kompresjonskrefter reduserer vanntreveksten[13][19]. Polymerisolasjon har mikroskopiske hulrom i isolasjonen. Dersom isolasjonen utsettes for strekkrefter vil disse hulrommene utvides, og med dette øker sannsynligheten for initiering av vanntrær. Det er også funnet at vekstraten for vanntrær vil øke med mekanisk strekk. Det motsatte er tilfelle for kompresjonskrefter, hvor hulrommene har en tendens til å bli mindre og på denne måten reduseres vanntreveksten.

Det er gjort lite forskning som beskriver vanntreveksten i PEX-kabler med dynamisk mekanisk belastning. Det er ikke dokumentert om dynamisk mekanisk belastning påvirker vanntreveksten mer enn statisk mekanisk belastning[16].

2.4 Innfryste krefter i ekstrudert kabelisolasjon

Det dannes også betydlige strekk- og kompresjonskrefter i den ekstruderte polymerisolasjonen under produksjonsprosessen[14]. Dette skyldes i hovedsak at polymeren har høy termisk ekspansjonsevne, og krymper når den avkjøles etter ekstrudering, mens lederen har lav termisk ekspansjonsevne og forblir uendret. Figur 2.4a viser hvordan PEX krymper ved avkjøling fra produksjonstemperatur til romtemperatur. De interne strekkreftene vil være størst nær lederen, og kompresjonskreftene størst i det ytre isolasjonsområdet. Kompresjonskreftene dannes i radiell retning som følge av at isolasjonsoverflaten nedkjøles fra utsiden etter ekstruderingen. Den ytre isolasjonsoverflaten blir dermed fast mens den indre delen av isolasjonen enda er i smeltet form og fortsatt holder høy temperatur. Ved videre nedkjøling vil den faste overflaten forhindre krymping av den indre isolasjonen og resultere i kompresjonskrefter. Strekkreftene lagres i kabelens aksielle retning, og har typisk verdi på 10-30MPa, noe som er i størrelsesorden med flytgrensen for polyetylen. Disse strekkreftene dannes som følge av at lederen har ekstremt mye lavere ekspansjonsevne i forhold til PEX-isolasjonen, og vil derfor nesten ikke endre sitt spesifikke volum ved temperaturreduksjon. Lederen hindrer på denne måten isolasjonen i å krympe til sitt likevektspunkt. Fordelingen av de interne kreftene i isolasjonen er kompleks, men de største strekkreftene lagres nær lederen i aksial retning. Kompresjonskrefter oppstår som sagt i radiell retning.

Av Figur 2.4b kan en se hvordan de innfryste kreftene er fordelt i kabelisolasjonen, og hvordan størrelsen på kreftene endres med temperaturen. I figuren er radiell retning betegnet som r og aksial retning som z . Siden størrelsen til de interne strekkreftene er på høyde med de som kan føre til brist i PEX, kan det antas at hulrom og små sprekke-dannelser finnes i isolasjonen allerede etter produksjonen, da spesielt i grenseflaten mellom indre halvleder og isolasjonen.



Figur 2.4: Endring i spesifikt volum for PEX ved nedkjøling fra produksjonstemperatur til romtemperatur (a) og innfrosne strekkrefter i en 66 kV PEX-kabel som funksjon av temperatur, negativt fortegn betegner kompresjonskrefter[21] (b)

2.5 Diffundering av vann i polymerer

Polymerisolasjon er et organisk materiale. Vann trenger igjennom slike materialer ettersom avstanden mellom molekylene er større enn selve vannmolekylet. Dette tillater absorpsjon av vannmolekyler. På denne måten kan vann diffundere gjennom polymerisolasjon. Metaller og glass er i motsetning til polymerisolasjon uorganiske materialer som ikke tillater vanninntrengning grunnet korte intermolekulære avstander[8].

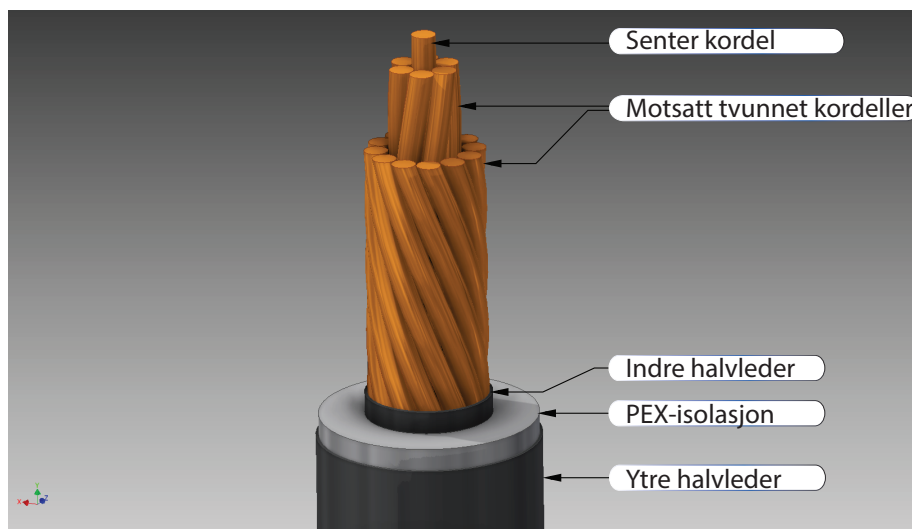
En skiller mellom tre tilstander for vann i polymere:

1. Som *oppløst vann*, hvor enslige vannmolekyler oppholder seg mellom polymerkjedene uten å reagere med andre vannmolekyl og polymerkjedene.
2. Som *bundet vann*, hvor vannmolekylene bindes til polymerkjedene ved dipol-krefter.
3. Som *Vann* i form av vanndråper.

3 Metodikk

3.1 Prøveobjektet

Prøveobjektet som er benyttet i alle forsøkene er en 12 kV trippelekstrudert PEX-kabel. Kabelen består av en kobberleder, indre halvleder, PEX-isolasjon og en ytre halvleder. Figuren under viser hvordan kabelen er satt sammen. Kobberlederen er bygget opp av 19 kordeller hvor to lag er motsatt tvunnet rundt senterkordelen. Med trippelekstrudert menes at indre halvleder, PEX-isolasjonen og ytre halvleder er ekstrudert på lederen i tre ulike lag.



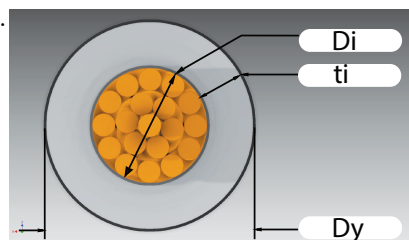
Figur 3.1: Illustrasjon av kabelen som er benyttet i forsøkene[17]

Halvlederene er laget av et plastmateriale med lav konduktivitet, som er tilsatt sot-partikler for å gjøre materialet litt ledende. Halvlederen skal hindre at det oppstår små hulrom og ujevnheter i grenseflaten mellom leder og isolasjon. Den indre halvlederen sørger for en mykere overgang mellom leder og PEX-isolasjon.

PEX-isolasjon er kryssbundet polyetylen.

Prøveobjektets **fysiske mål**:

- Indre diameter, $D_i = 11.4\text{mm}$
- Ytre Diameter, $D_y = 20.8\text{mm}$
- Isolasjonstykkelsen, $t_i = 4.7\text{mm}$

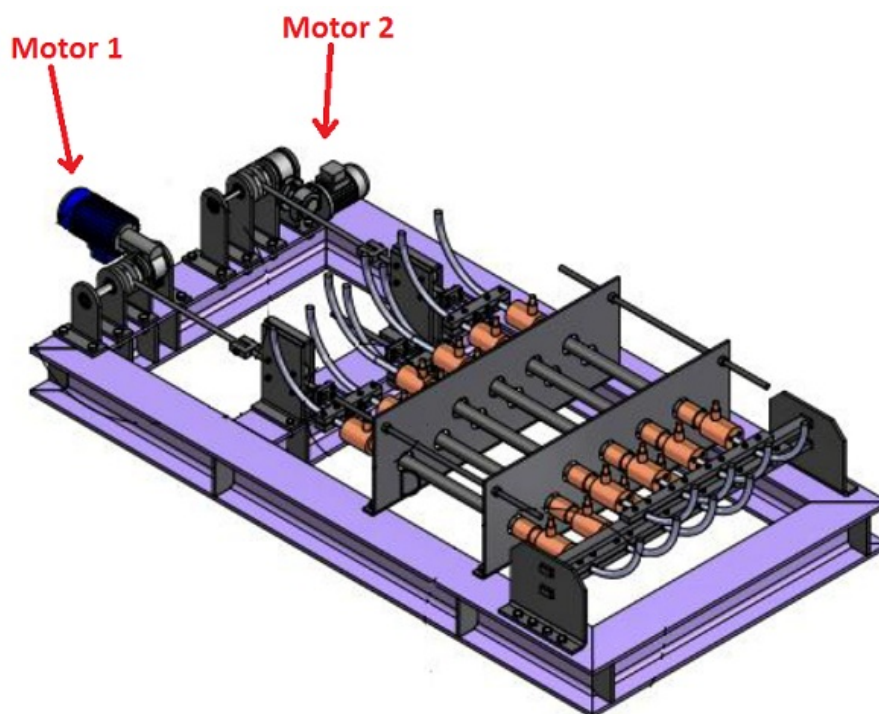


Figur 3.2: Kabelens tverrsnitt[17]

3.2 Metodeutførelse

3.2.1 Mekanisk testrigg

Den mekaniske testriggen kan utsette kabler for både statisk og dynamisk belastning. Det sitter fastmontert to motorer som kan påføre kabler dynamisk mekanisk strekk, vist i Figur 3.3. Motor 1 går med en frekvens på 1,0 Hz, mens motor 2 har en frekvens på 0,1 Hz. Grunnet mye slitasje på akslingene og bevegelige deler ved tidligere forsøk ble disse byttet ut med nye og mer robuste deler laget på verkstedet for Elkraftteknikk ved NTNU. Oppsettet til begge motorene ble dermed kraftig forsterket for å kunne tåle de mekaniske påkjenningene. Den mekaniske testriggen ble brukt til både statisk og dynamisk strekk av kabler.



Figur 3.3: Den mekaniske testriggen som brukes i forsøkene[14]

3.2.2 Kabelisolasjonens strekkprosent

Det var kabelisolasjonen som skulle utsettes for mekanisk belastning i forsøkene. Lengden mellom festepunktene i den mekaniske testriggen er 100 cm. For å beregne strekket på isolasjonen benyttes følgende formel:

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (3)$$

Hvor ϵ er isolasjonens strekkprosent, ΔL er endring i kabellengden og L er

lengden på kabelen. For å oppnå ønsket strekk på 1% må kabelen strekkes 1 cm i testtriggen. Denne strekkprosenten er begrunnet i kap 1.4.

3.2.3 Fremstilling av kabelobjekter

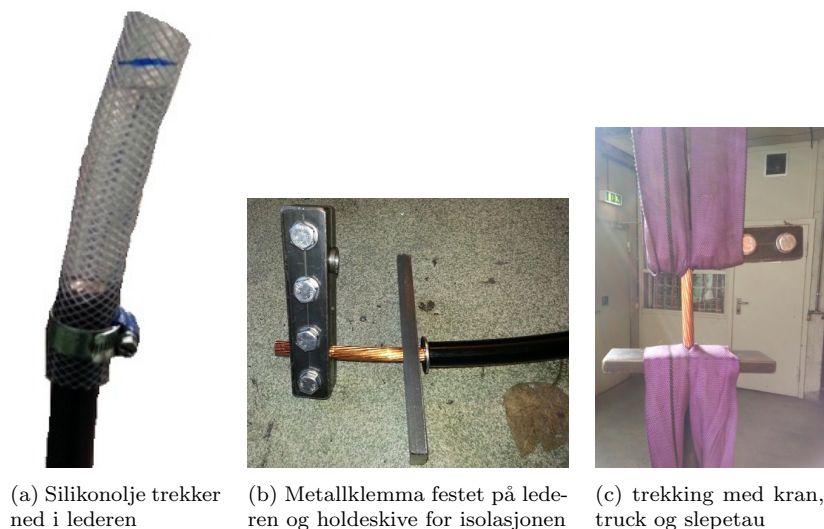
Før kabelene kunne utsettes for statisk og dynamisk mekanisk strekk på testtriggen, måtte det lages kabelobjekter. Det ble funnet at optimal lengde på kabelobjektene var 3 meter. Med denne lengden har en litt å gå på i tilvirkningen av objektene, samtidig som det ikke opptar for stor plass i høyspenningscella. I en kabel som utsettes for strekkrefter vil kraften tas opp av både leder, isolasjon og eventuell armering. Ettersom det var isolasjonen som skulle strekkes ble lederen trukket ut av isolasjonen der det påføres strekkrefter.

uttrekking av lederen

I en trippelstrudert kabel vil det være stor friksjon mellom leder og indre halvleder. Dette skyldes at den indre halvlederen blir ekstrudert direkte på lederen under produksjonen. For å kunne trekke ut lederen måtte friksjonen gjøres mindre slik at isolasjonen ikke ble deformert. Friksjonen ble redusert ved å la silikonolje trekke nedover langs lederen. Det ble benyttet en metode hvor en plastslange ble festet til den ene enden av kabelen med en rørklemme. Deretter ble kabelen plassert loddrett i en fastbenk. Silikonoljen ble så fylt oppi plastslangen. Etter ca 30 minutter kom det silikonolje ut på andre siden, og hele kabellengden var godt innsmyrt.

Før lederen kunne trekkes ut måtte ca 10 cm av isolasjonen fjernes for å danne et festepunkt. Dette ble gjort ved bruk av en kabelskreller. En metallskive med hull i sentrum ble så tredd på lederen. Diameteren til hullet var tilpasset lederen slik at metallskiven akkurat passet. En større og mer massiv metallplate ble deretter tredd utenpå den innerste metallskiva. Disse to skivene brukes til å holde igjen isolasjonen. Det ble benyttet en metallklemme som festepunkt ytterst på lederen.

For å trekke ut lederen ble det brukt truck, kran og slepetau. Slepetauet festes bak på trucken og til metallplaten ved isolasjonen. Metallklemma på lederen ble så festet til krana med et annet slepetau. Vekten til trucken brukes til å holde igjen isolasjonen, mens krana trakk i metallklemma som var festet til lederen. Lederen ble ikke trukket helt ut av isolasjonen. Det ble merket opp hvor lederen skulle beholdes, slik at punktet kan brukes til å lage festepunkt på kabelobjektene til den mekaniske testtriggen. Figur 3.4 viser prosedyren for uttrekking av lederen.



Figur 3.4: Prosedyren for uttrekking av lederen

Måling av PEX-isolasjonens krymping

PEX-isolasjonen vil trekke seg sammen eller krympe i det området hvor lederen trekkes ut. Krympingen registreres ved å markere opp 50 og 100 cm med teip før uttrekking. Etter at lederen var trukket ut ble krympingen målt med en linjal.

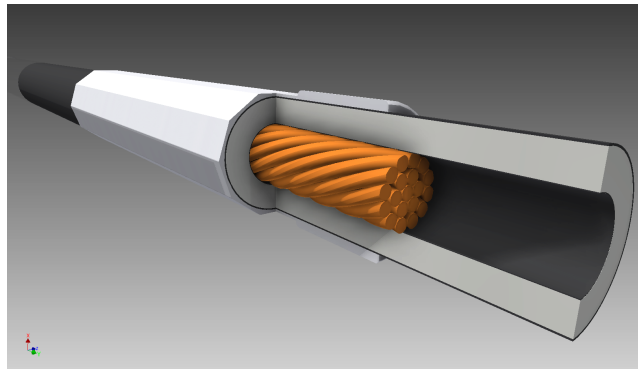
Montering av festepunkter

Det ble laget spesielle festepunkter på kabelobjektet der de skulle festes til den mekaniske testtriggen. Dette var nødvendig for å hindre slitasje og ødeleggelser på kabelobjektene under forsøket. For hvert kabelobjekt måtte det lages to festepunkter, med en avstand på 100 cm mellom dem.

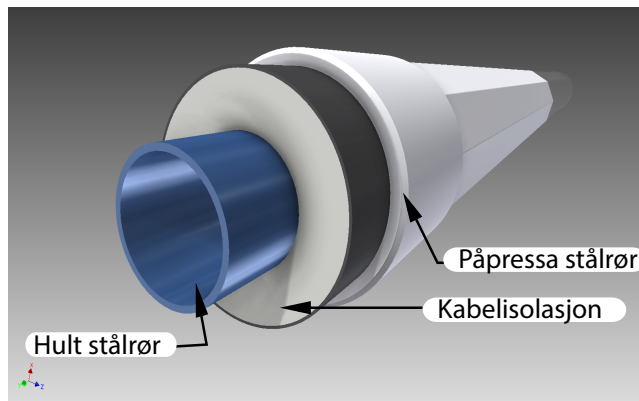
Festepunktene lages ved å klemme 10 cm lange stålrør fast til isolasjonen i en kabelpresse. Dette ble gjort ved verkstedet for elkraftteknikk. I denne prosessen klemmes stålrørene på kabelen med rimelig stor kraft. Dersom stålrørene klemmes på uten at noe dekker hulrommet der hvor lederen var vil isolasjonen klemmes flat. Dette vil hindre vann i å slippe forbi festepunktet.

I uttrekkingsprosessen av lederen ble det merket opp akkurat hvor lederen skulle stoppe inne i isolasjonen. Grunnen til dette var at lederen da kan brukes til det ene festepunktet. Stålrøret plasseres akkurat over der hvor lederen slutter, som vist i Figur 3.5. Lederen gir da den nødvendige motkraften i klemmeprosessen.

Det andre festepunktet lages ved å dytte et hult stålrør inn i lederkanalen der hvor stålrøret skal klemmes på kabelen. Det hule stålrøret var rustfritt og har en diameter på 10mm. Lengden på det hule stålrøret ble laget litt lenger enn stålrørene som skal klemmes på kabelobjektet for å være sikker på at de overlapper hverandre. Stålrøret i lederkanalen var hult slik at vann kunne passere festepunktet uten problem. Denne typen festepunkt vises i Figur 3.6.



Figur 3.5: Festepunkt med leder[17]



Figur 3.6: Festepunkt med hult stålrør i lederkanalen[17]

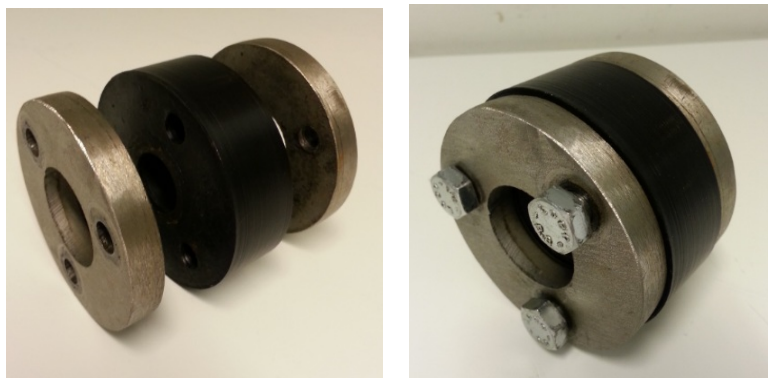
Vannrør

Kabelobjektene skal utsettes for fuktige omgivelser i forsøkene. Det skal være vann både i lederkanalen og utenfor kabelisolasjonen. For å få vann på utsiden av isolasjonen ble det tatt i bruk spesielle vannrør som vist i Figur 3.7, med mulighet for vanngjennomstrømming. Vannrørene består av to messinghylser med et plastrør i mellom dem. Kabelisolasjonen som skal studeres må være inne i plastrøret gjennom hele forsøket.



Figur 3.7: Vannrør med mulighet for gjennomstrømming

På messinghylsene sitter det tilkoblingspunkter for vannslanger slik at plastrøret kan fylles med vann. Messinghylsene benyttes også til å feste kabelobjektene til vannrøret. Her brukes det et vanntett forseglingsystem. Figur 3.8 viser festet som består av en gummipakning, to gjenget metallskiver og tre skruer. Gummipakningen og metallskivene har hull gjennom seg slik at kabelen kan tres igjennom. Gummipakningen plasseres mellom de to metallskivene. Når disse skrues sammen klemmes gummi slik at den utvider seg i radiell retning. Festet passer akkurat inn i messinghylsa før det skrues skikkelig sammen. Når det skrues sammen vil gummipakningen presses mot veggene i messinghylsa. Det dannes så en vanntett forsegling.

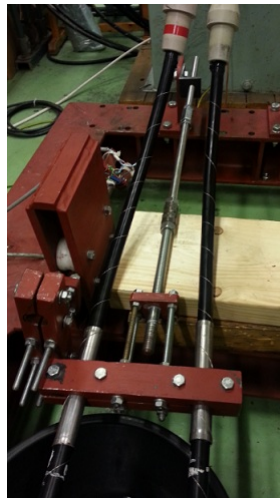


Figur 3.8: Vanntett forsegling som festes i messinghylsene og holder kabelobjektene i plastrøret

Det ble benyttet et enkelt system til fylling og kontroll av vann i lederen. I hver ende av kabelobjektet ble det tredd på et plastrør som festes med rørklemmer. For å hindre fordamping og vannsøl ble det plassert en gummikork på toppen av plastrørene. Det ble ikke benyttet kork i enden hvor lederen var. Før plastrørene monteres må det lages endeavslutninger, se kap 3.2.7. Plastrørene settes derfor på helt til slutt. Figur 3.13b viser systemet for fylling og kontroll av vann i lederkanalen.

3.2.4 Statisk mekanisk belastning av kabler

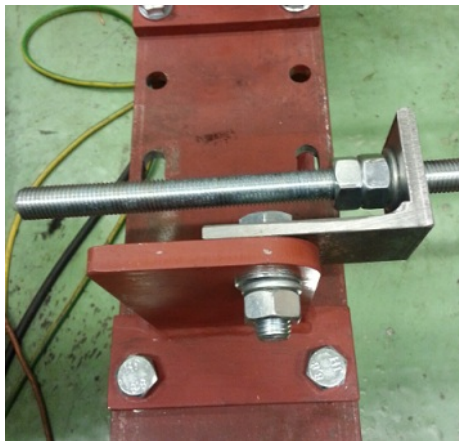
Ved å ta i bruk festeanordningene på testriggen og et justerbart stag ble kabelobjektene utsatt for statisk strekk. Kabelobjektene ble festet til festeanordningene på testriggen. Det ble brukt et justerbart stag til å strekke kabelobjektene. Ytterst på staget var det skrudd på klemmer som festes til kabelobjektene. Staget var gjenget og ble satt fast til testriggen ved bruk av muttere og en holdeskive av metall, som ikke var gjenget. Midt på staget sitter det en fast mutter. Når en skrur på mutteren vil staget skru seg innover mot festepunktet til kabelobjektene. På denne måten kan kabelobjektene strekkes. Oppsettet kan studeres i Figur 3.9.



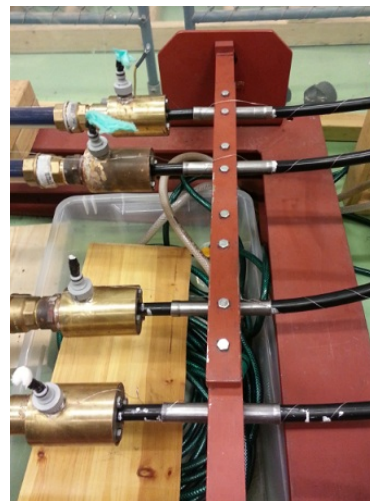
(a) Gjenget stag for strekk med festepunkter til kabelobjektene



(b) Fast mutter på staget til justering av strekket



(c) Holdeskive for staget



(d) Festeanordningen på testriggeren

Figur 3.9: Statisk mekanisk oppsett på den mekaniske testriggeren

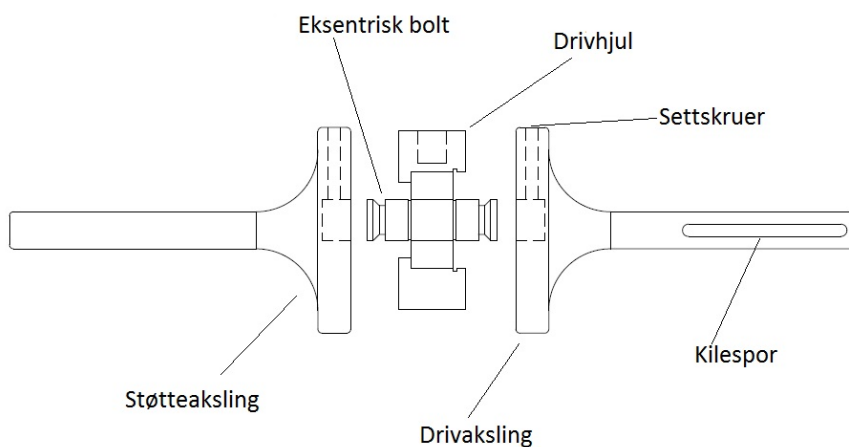
3.2.5 Dynamisk mekanisk belastning av kabler

Motor og omdreiningssfrekvens

Det brukes to elektriske motorer for å lage den dynamiske strekkraften på kabelobjektene. Motoren som roterer raskest har en frekvens på 1,0 Hz, og bruker dermed 1 sekund per omdreining. Den andre motoren har en frekvens på 0.1 Hz, som tilsvarer 10 sekunder per omdreining. En styringsboks på utsiden av høyspenningscella brukes for å skru motorene av og på.

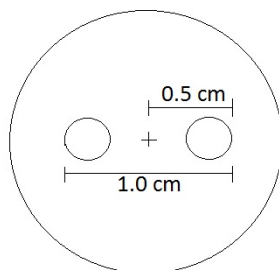
Drivsystemet

De to motorene på den mekaniske testtriggen driver hver sin aksling. Figur 3.10 viser hvordan drivsystemet for motoren med lavest frekvens settes sammen. Drivakslingen kobles til motoren med et kilespor. Et drivhjul kobles til drivakslingen gjennom en eksentrisk bolt. Den eksentriske bolten festes til drivakslingen med settskruer. Drivhjulet har et toradig vinkelkontaktkulelager for å unngå friksjon mellom drivhjulet og den eksentriske bolten. For å fordele momentet som drivhjulet vil påføre systemet benyttes en støtteaksling. Denne akslingen vil være symmetrisk med drivakslingen og festes til den eksentriske bolten. Drivhjulet står da midt mellom de to akslingene, med en eksentrisk posisjon. Det er festet et stag til drivhjulet, og den andre endene av staget utgjør festepunktet der kabelobjektene skal festes.



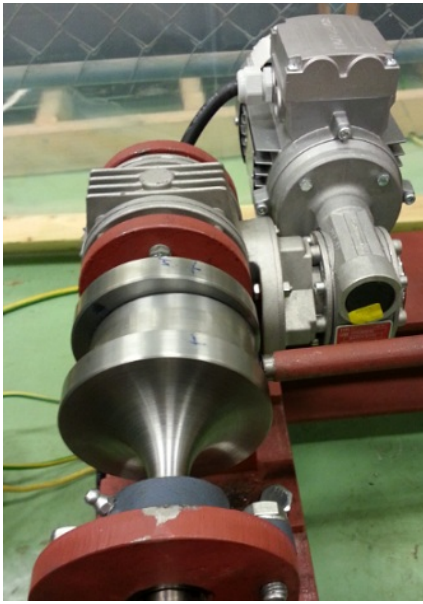
Figur 3.10: Drivsystemet for motoren med frekvens på 0,1 Hz

Akslingen får en rotasjonsbevegelse når motoren starter. Ettersom den eksentriske bolten ble festet 0.5 cm ut fra akslingens sentrum, vil drivhjulet påføre staget et bevegelsesutslag på 1 cm i horisontalplanet, som vist i figuren under.



Figur 3.11: Skisse av plasseringen til den eksentriske bolten og det totale bevegelsesutslaget på 1 cm

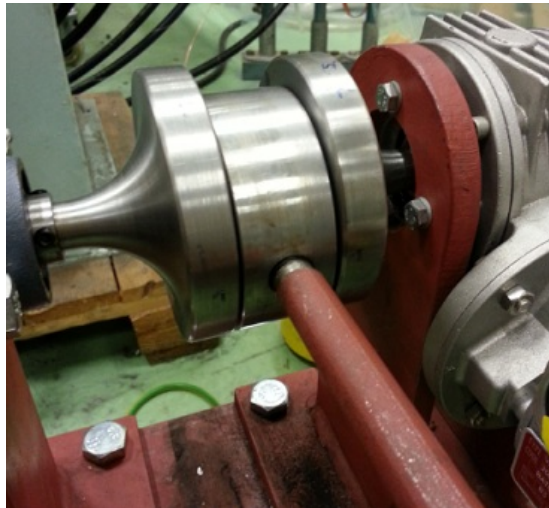
For 1,0 Hz motoren ble drivaksling og drivhjul plassert litt annerledes enn for 0,1 Hz motoren. Drivhjulet monteres i enden av en mer kraftig drivaksling som støttes av to støttebraketter, se Figur 3.12b. Dette drivsystemet antas å kunne tåle relativt store belastninger grunnet den kraftige dimensjonen. Figur 3.12 viser drivsystemet for dynamisk strekk av kabelobjekter på den dynamiske testtriggen.



(a) 0,1 Hz motor med aksling og drivhjul



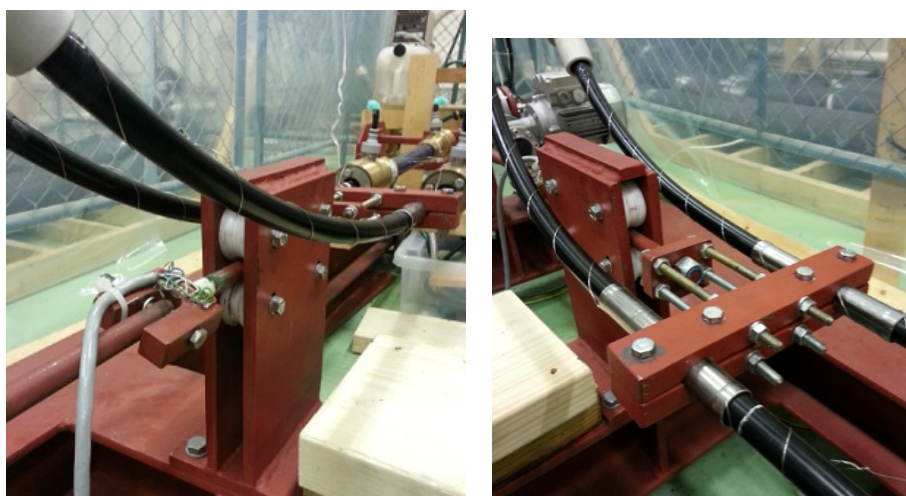
(b) 1,0 Hz motor med aksling og drivhjul



(c) Staget festes til drivhjulet i et gjenget hull for begge motorene

Figur 3.12: Drivsystemet for dynamisk strekk av kabelobjekter

Staget skal overføre den mekaniske bevegelsen til kabelobjektene, og består av to deler som festes til hverandre i et ledd. Den første delen av staget festes til drivhjulet. Den andre delen har festepunkter til kabelobjektene. Det bevegelige leddet hvor de to delene festes til hverandre skal hindre at vertikale bevegelser påføres kabelobjektene. Den delen av staget som tilhører drivhjulet vil få noe bevegelse i vertikalretning. Leddet alene vil ikke være nok til å hindre disse vertikale bevegelsene. Den delen av staget som skal festes til kabelobjektene støttes derfor opp av en støttebrakett. Staget står plassert mellom fire plasthjul som sitter fast i et stålhus. To hjul på oversiden og to på undersiden av staget. På denne måten vil staget kun bevege seg frem og tilbake uten bevegelse i vertikalretning. Figur 3.13 viser oppsettet for staget som overfører den dynamiske bevegelsen.



(a) Støttebrakett og det bevegelige leddet som knytter staget sammen

(b) Festepunkt til kabelobjektene ytterst på staget

Figur 3.13: Staget som overfører den dynamiske bevegelsen til kabelobjektene

3.2.6 Kabelobjekt uten mekanisk påkjenning

Det ble også laget ulike kabelobjekt som skulle aldres uten noen form for mekanisk påkjenning. Et kabelobjekt med uttrekt leder ble satt ved siden av testtriggen og brukes til sammenligning med kabelobjektene utsatt for statisk og dynamisk mekanisk strekk. Det ble også laget kabelobjekter hvor lederen ikke ble trukket ut. Et kabelobjekt med uttrekt leder ble varmet opp i et varmeskap for å frigjøre innfrosne krefter. Ved fremstilling av disse kabelobjektene trengs det ikke festepunkter til den mekaniske testtriggen.

Varmebehandlet kabelobjekt

Det ble bestemt å fjerne kobberlederen før varmebehandlingen. Dette var for å sikre at isolasjonen kunne krympe fritt ved nedkjøling, og på denne måten antas det å få en større avspenning av innfrosne strekkrefter i kabelisolasjonen. Før

kobberlederen ble trukket ut av kabelen ble 50 og 100 cm merket av med teip på PEX-isolasjonen. Dette ble gjort for å måle hvor mye isolasjonen krymper både ved uttrekking og etter varmebehandlingen. Kabelobjektet ble plassert i et stort varmeskap, men grunnet dårlig plass måtte kabelen bøyes litt. Området hvor krympingen skulle måles lå forholdsvis rett på en trepall. Det ble festet et termoelement til overflaten av isolasjonen slik at korrekt temperatur ved isolasjonsoverflaten kunne måles. Varmeskapet ble varmet opp slik at det holdt en temperatur på 120 °C, og kabelen ble liggende i varmeskapet i 2 døgn før det ble skrudd av. Krympingen til isolasjonen ble registrert mens den ble avkjølt rolig ved å kun åpne en liten lufteluke på døren til varmeskapet. Utvidelsen til PEX-isolasjonen ved 120 °C ble ikke registrert fordi isolasjonen var så myk at det var vanskelig å få noe nøyaktig mål samtidig som det var veldig varmt inne i skapet. Det var uansett ikke vanskelig å se at isolasjonen hadde utvidet seg både i aksial og radiell retning. Isolasjonens aksielle krymping ble registrert når temperaturen i skapet hadde blitt litt lavere. Etter en måling av krymping ved 67,2 °C ble registreringen vanskelig igjen fordi kabelisolasjonen stivnet i en ujevn form på grunn av plassmangel og underlaget den lå på. Kabelen ble derfor varmet opp til 120 °C slik at den ble myk igjen. For at kabelen skulle stivne uten å innføre ujevnheter ble den tatt ut av varmeskapet mens den fortsatt var så myk at den kunne formes. Kabelen ble så lagt på gulvet og formet slik at den lå rett. Det ble så foretatt en måling av krymping når kabelen var helt avkjølet ved 21,1 °C.

Kabelobjekt med kobberleder

Det ble laget to kabelobjekt hvor kobberlederen ble beholdt. Det ene kabelobjektet ble plassert ved siden av testtriggen og kan sammenlignes med kabelobjekt uten leder og mekanisk belastede kabler.

Det andre kabelobjektet ble laget med det formål å påtrykke en høyere spenning. Dette ble gjort for å få lik elektrisk feltstyrke ved den ytre halvlederen som det andre kabelobjektet med leder har ved indre halvleder, se Tillegg B for utregning.

3.2.7 Elektrisk oppkobling

Før det kan påtrykkes spenning på kabelobjektene må det lages endeavslutninger. Det må også settes på koronaringer rundt skarpe kanter i den elektriske kretsen.

Endeavslutninger

For å hindre overslag og partielle utladninger (PD-utladninger) i kabelendene må det lages endeavslutninger. PEX-isolasjonen er utsatt for nedbrytning av PD-utladninger. Endeavslutninger lages ved å montere på stresskoner (eng: stress cones) som sørger for en jevn fordeling av det elektriske feltet i kabelavslutningen.

Ved montering av stresskonene må ca 30 cm av den ytre halvlederen fjernes i kabelendene. En elektrisk kabelskreller festes til kabelen og en justerbar kniv skjærer av den ytre halvlederen. For å hindre uregelmessigheter i isolasjonsoverflaten der stresskonen skal monteres blir isolasjonen pusset med sandpapir. Det kritiske området i stresskonen vil være i overgangen mellom PEX-isolasjonen og der ytre halvleder slutter. Dette området bør være retttest mulig for å unngå feltforsterkninger. En halvledende lakk påføres derfor i overgangen. Lakken påføres i to lag og dekker et område på 1 cm ut fra den ytre halvlederen.

Stresskonen består av en halvledende elektrode og et isolerende materiale. Den har en utforming som gjør at det elektriske feltet fordeler seg bedre i endeavslutningen. Når stresskonene monteres ble de presset inn på kabelen slik at den halvledende elektroden kommer i kontakt med den ytre halvlederen. Stresskonen sitter da i overgangen mellom PEX-isolasjon og ytre halvleder. Silikonpasten må benyttes under montering for å gjøre det lettere å tre den på kabelen. Dessuten hindrer silikonpasten at det dannes små luftbobler i overflaten mellom kabelen og stresskonen. Figur 3.14 viser endeavslutninger og designet til stresskonene.



(a) Endeavslutning med stresskoner



(b) Plastrør montert med rørklemmer hvor en enkelt kan følge med på vannivået i lederkanalen

Figur 3.14: Stresskoner og plastrør for vannfylling i lederkanalen

Koronaringer

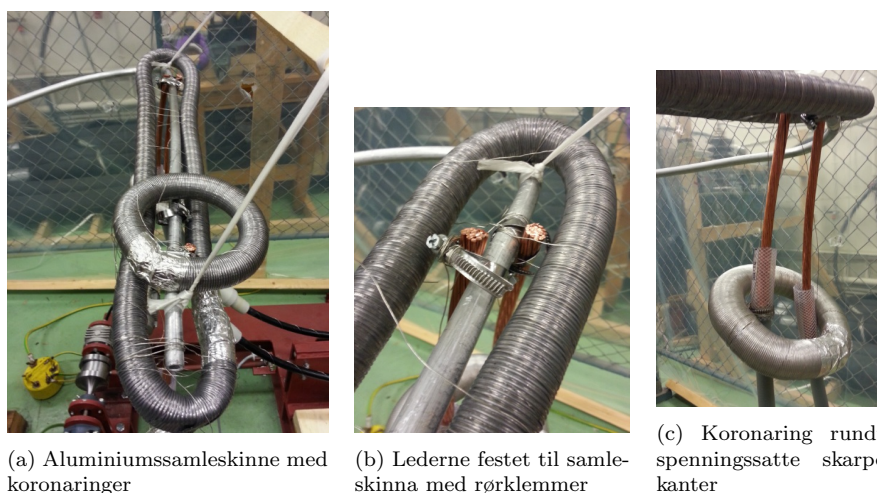
Koronaringer må plasseres rundt alle skarpe kanter i kretsen for å unngå koronaeffekter. Det lokale elektriske feltet rundt skarpe kanter kan være stort nok til å ionisere luften rundt. Dette kan resultere i små elektriske utladninger, korona. Denne effekten vil være uønsket. Ledende koronaringer har en geometrisk form som avrunder feltet slik at de lokale feltforsterkningene opphører. Koronaringer

vises i Figur 3.15.

Spenning og elektrisk feltstyrke

Spenningen kobles til den enden av kabelobjektene hvor lederen fortsatt sitter igjen. Lederne festes til et aluminiumsrør med rørklemmer, som vist i Figur 3.15. Aluminiumsrøret fungerer som en samleskinne og kobles til transformator. For å stille spenningen inn på transformatoren brukes en variac med maksimal spenning på 220 V. Variacen som brukes har digital spenningsavlesning, samtidig som det brukes multimeter. Kabelobjektene ble påtrykt en 50 Hz vekselspenning hvor $U = 2U_0 = 13,85 \text{ kV}$. For å oppnå denne spenningen på sekundærsiden av transformatoren må det påtrykkes en inngangsspenning på 28,6 V fra variacen. Dette ble kontrollert ved å feste en spenningsprobe på aluminiumsrøret. Spenningen på variacen økes helt til multimeteret tilkoblet spenningsproben inne i høyspenningscella viser 13,85 kV. Digital spenningsavlesning på variacen viser da 26 V, mens multimeteret tilhørende variacen viser 28,6 V. Dette skyldes at den digitale avleseren på variacen viser noe unøyaktig verdi. Spenningen blir kontrollert jevnlig gjennom hele forsøksperioden.

Den påtrykte spenningen gir et gjennomsnittlig elektrisk felt $E_{gjennomsnitt}$ på 2,95 [kV/mm], se tillegg B for utregning. Den maksimale feltstyrken oppstår ved den indre halvlederen hvor $E_{max} = 4 \text{ [kV/mm]}$. Den ytre halvlederen vil oppleve den laveste feltstyrken hvor $E_{min} = 2,2 \text{ [kV/mm]}$.



Figur 3.15: Elektrisk oppkobling for spenningspåkjenning

Det gjøres også forsøk med 25 kV påtrykt vekselspenning på det ene kabelobjektet med lederen beholdt. Dette ble gjort i en annen høyspentcelle parallellt med de andre forsøkene. En annen transformator med et annet spenningsforhold ble tatt i bruk. For å oppnå en spenning på 25 kV på sekundærsiden av denne transformatoren måtte det påtrykkes en inngangsspenning på 115 V fra variacen. Spenningen ut på kabelobjektet ble målt med et multimeter som ble festet til samleskinna ved sekundærsiden av transformatoren. Med en spenning

på 25 kV tilkoblet kabelobjektet vil den elektriske feltstyrken ved ytre halvleder være $E_{min} = 4$ [kV/mm]. Dette vil være et like stort elektrisk felt som oppstår ved den indre halvlederen for kabelobjektene som påtrykkes 13,85 kV. På denne måten kan det verifiseres om det er det elektriske feltet eller de innfryste strekk- og kompresjonskreftene som gjør seg mest gjeldende for vanntreveksten, og det legger grunnlag for en bedre analyse.

3.2.8 Vanntreanalyse

Vantrær studeres i mikroskop. Før kabelisolasjonen kan studeres i mikroskop må den snittes opp og farges inn.

Spiralisering

Kabelisolasjonen plasseres i en dreiebenk. En kniv snitter opp isolasjonen mens kabelen roterer. Det lages da en spiral med snittykkelse på 0.5 mm. Denne metoden benyttes for å spare tid. Det går fortere å spiralisere isolasjonen enn å kutte opp ett og ett snitt med et mikrotom.



Figur 3.16: Spiralisert isolasjon klar til innfarging

Innfarging med metylenblått

Det vil være vanskelig å detektere vantrær i tørr kabelisolasjon. Når kabelen tas opp av vannet vil vannet tørke, og etterlater seg vanntrekanaler som ikke enkelt lar seg skille fra omkringliggende isolasjon. Kabelisolasjonen ble derfor farget inn etter en prosedyre hvor metylenblått benyttes. Tabell 1 viser ingredienser og tilhørende mengde som brukes for å lage fargeblandingen.

Tabell 1: Ingredienser og tilhørende mengde for å lage metylenblått

Ingrediens	Mengde
Metylenblått	54 g
Natriumkarbonat	4,5 g
Vann	1,8 L

Ingrediensene i Tabell 1 blandes sammen i et 3 liters begerglass. Det legges en magnetrører i blandingen før den settes inn i et varmeskap som holder en temperatur på 67,5 °C. Aluminiumsfolie legges over begerglasset for å hindre fordamping. Tabell 2 viser oppskriften som benyttes til innfarging av isolasjons-spiralene. Før den spiralisererte kabelisolasjonen kan legges i fargeblanding må den deles opp i mindre spirallengder, og festes med ståltråd til små ringer slik som vist i Figur 3.16. Dette gjøres for at fargen skal komme i kontakt med hele overflaten av spiralen.

Tabell 2: Oppskrift for innfargingsprosessen

Hendelse	Temperatur	Tid
Begerglasset med blandingen plasseres i skapet, magnetrører skrues på	67,5 °C	t = 5 timer
Magnettrører skrues av, blandingen beholdes i skapet	67,5 °C	t ≥ 20 timer
Magnettrører skrues på	67,5 °C	t = 1 time
Isolasjonsspiralene legges i blandingen, ingen røring	67,5 °C	t = 4,5 timer

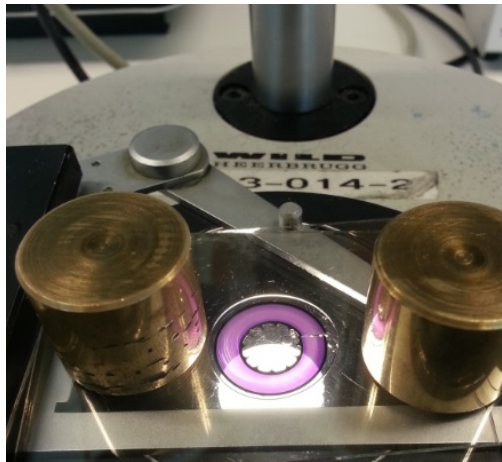
Etter å ha gjennomgått oppskriften i tabell 2 legges spiralene i et begerglass med varmt vann i et døgn. Fargen vil dermed fremkalles bedre. Spiralene tørkes på papir før de kan analyseres.

Blanding med metylenblått kan brukes flere ganger, men fargekvaliteten avtar etterhvert. Det kan derfor være vanskelig å beregne innfargingstiden. Med en helt ny blanding kan fargen fort bli veldig mørk. Dette gjør at det kan bli krevende å skille vanntreer fra forurensninger i isolasjonen. I en brukt blanding kan fargen fort bli for lys og det blir vanskelig å se vanntreer.

Mikroskopanalyse

Det benyttes et stereomikroskop for å analysere isolasjonssnittene. Fra spiralene klippes det opp ett og ett snitt. Før snittet studeres i mikroskopet blir det rensert med isopropanol og dyppes i mikroskopolje(dimetylen phthalate). Isopropanolen fjerner urenheter i overflaten og dimetylen phthalate gir snittet en glattere overflate. Spiraliseringsprosessen etterlater spor i isolasjonen og tiltakene gjør at det blir lettere å se vanntreer. Figur 3.17 viser et snitt slik det studeres i mikroskopet.

Det ble først påbegynt en veldig omfattende analyse av kablene for å kartlegge vanntreveksten i de ulike kabelobjektene. I denne analysen ble følgende registrert

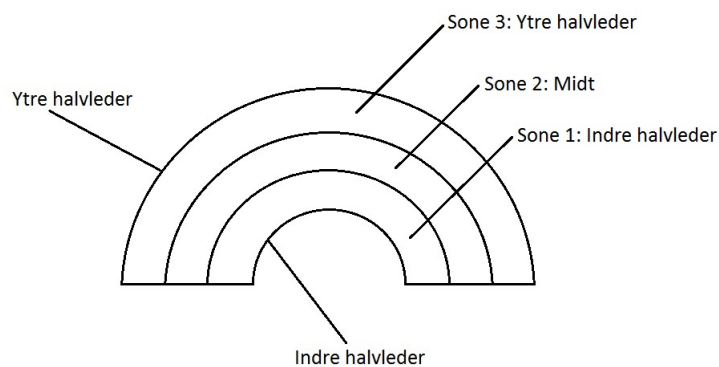


Figur 3.17: Et snitt studeres i mikroskopet etter innfarging

i hvert snitt:

- Antall bow-tie trær og posisjonen(sone). Isolasjonssnittene deles inn i tre like store soner; Indre halvleder, midten og ytre halvleder. Figur 3.18 viser soneinndelingen.
- Lengden til det lengste bow-tie treet.
- Lengden og posisjonen til alle ventilerte vanntrær.

Dersom et vanntrø var så lite at det ble usikkert om det var et vanntrø eller en forurensning ble det ikke registrert. Denne deteksjonsgrensen er på omtrent 30 μm .



Figur 3.18: Isolasjonens soneinndeling

Analysen med å registrere alle bow-tie trær med tilhørende sone i isolasjonen ble veldig tidkrevende. Det er i hovedsak ventilerte vanntrær som reduserer en kabels levetid[22]. Etter 4 cm analysert kabellengde av de mekanisk belastede kabelobjektene ble det derfor besluttet å effektivisere analysen. I hvert snitt ble

analysen kortet ned til å kun registrere det lengste bow-tie treet samtidig som alle ventilerte vanntrær ble registrert. Det ble sett på som viktigere å få et bedre analysegrunnlag for de ventilerte vanntrær ved å få analysert lengst mulig kabellengde. Analysen med bow-tie trær er allikevel av betydning, og det kan gi nyttig informasjon å sammenligne veksten av bow-tie trær i kabler aldrer ved ulike betingelser.

Gjennomsnittlig maksimal lengde

Gjennomsnittlig maksimal lengde, $\overline{l_{max}}$, representerer gjennomsnittet av lengden til det lengste bow-tie treet funnet i hvert snitt. $\overline{l_{max}}$ presenteres for alle kabelobjektene og skrives noen ganger som $l_{av,max}$. Den gjennomsnittlige maksimale lengden gir et godt sammenligningsgrunnlag uten at en trenger å måle lengden av alle bow-tie trær i isolasjonen.

En kan også for eksempel presentere den gjennomsnittlig maksimale lengden per 5 mm isolasjon, $\overline{l_{max,5mm}}$, i stedet. Dette representerer gjennomsnittet av lengden til det lengste bow-tie treet funnet i 10 snitt, 5 mm isolasjonslengde.

For ventilerte vanntrær blir gjennomsnittslengden, l_{av} , brukt grunnet færre trær.

Forekomst av ventilerte vanntrær per arealcentimeter isolasjon

Inspisert isolasjonslengde kan være forskjellig fra kabel til kabel, og antall ventilerte vanntrær funnet i hver kabel kan derfor ikke sammenlignes med hverandre. For å kunne ha et sammenligningsgrunnlag ble antall ventilerte vanntrær dividert med arealet av overflaten som de er initiert ved.

Ved den indre halvlederen må antall ventilerte vanntrær divideres med arealet av den indre overflaten:

$$n = \frac{1}{A_{indre}} = \frac{1}{2\pi r_i l} \quad (4)$$

Ved den ytre halvleder må antall ventilerte vanntrær divideres med arealet av den ytre overflaten:

$$n = \frac{1}{A_{indre}} = \frac{1}{2\pi r_y l} \quad (5)$$

n [$1/cm^2$] viser dermed forekomsten av ventilerte vanntrær per arealenhet.

Forekomst av bow-tie trær per kubikkmillimeter isolasjon

Forekomst av bow-tie trær blir presentert per kubikkmillimeter isolasjon, n [$1/mm^3$]. Når en ser på forekomsten av bow-tie trær i hele isolasjonstykkelsen divideres antall trær med volumet av sylindere som er analysert:

$$n = \frac{1}{V} = \frac{1}{\pi(r_y^2 - r_i^2)l} \quad (6)$$

Forekomsten av bow-tie trær er dermed presentert som tetthet av trær per volumenhet. Tettheten av bow-tie trær per volumenhet isolasjon i de tre inndelte sonene (indre halvleder, midt og ytre halvleder) finnes på samme måte, bare at isolasjonstykkelsen deles inn i 3 like store deler. På denne måten vil volumet i området ved den ytre halvlederen være større enn volumet i midten og ved indre halvleder.

I Tabellene i Tillegg A er forekomsten av bow-tie trær presentert per centimeter isolasjon, n [1/cm].

Estimering av maksimal vanntrelengde med bruk av ekstremalverdistatistikk

Lengden til det lengste treet, l_{max} , vil variere fra prøve til prøve og kan behandles som en stokastisk variabel. I denne oppgaven vil 0,25 og 0,5 cm analysert isolasjon utgjøre en prøve, men ved høy vanntrevekst brukes typisk ett snitt som en prøve. Sannsynligheten for å finne et vanntre større enn en kritisk lengde, x , i en gitt kabellengde kan anslås hvis distribusjonsfunksjonen til l_{max} er kjent. Følgende sannsynlighetsfordelingen til det lengste treet i hvert snitt, l_{max} , kan benyttes[23]:

$$P(l_{max} < x) = W(x) = \exp\left[-\left(\frac{w-x}{w-v}\right)^\beta\right] - \infty < x \leq w \quad (7)$$

Her er P sannsynligheten med parameterene v og β i sannsynlighetsfordelingen. Analyseverdiene av l_{max} bestemmer parameterene i sannsynlighetsfordelingen, v er 36,8%-verdien og β er et tall for spredningen. En beskrivelse av hvordan disse parameterene finnes og hvordan den maksimale lengden til bow-tie trær i en 1 meter lang kabel kan estimeres med en gitt sannsynlighet finnes i Tillegg C.

4 Resultater

Dette kapittelet presenterer resultater fra mikroskopanalysen, samt resultater fra måling av PEX-isolasjonens krymping ved tilvirkning av kabelobjekter. Resultatene er presentert i grafer og tabeller. Verdiene som brukes til de grafiske fremstillingene kan finnes i tabeller i Tillegg A. Ventilerte vanntrær fra indre halvleder presenteres i dette kapittelet som ventilerte vanntrær. Det er tydelig merket der resultater med ventilerte vanntrær fra ytre halvleder presenteres.

4.1 Måling av PEX-isolasjonens krymping

PEX-isolasjonens krymping ved uttrekking av kobberlederen

Tabell 3 viser hvor mye PEX-isolasjonen krymper fra en startlengde på 0,5 og 1,0 meter ved uttrekking av kobberlederen. Det er som vist i tabellen gjort målinger på 6 kabler, hvor det er funnet at den totale gjennomsnittlige krympingen i kabelens aksielle retning ved uttrekking av lederen er på 0,7%.

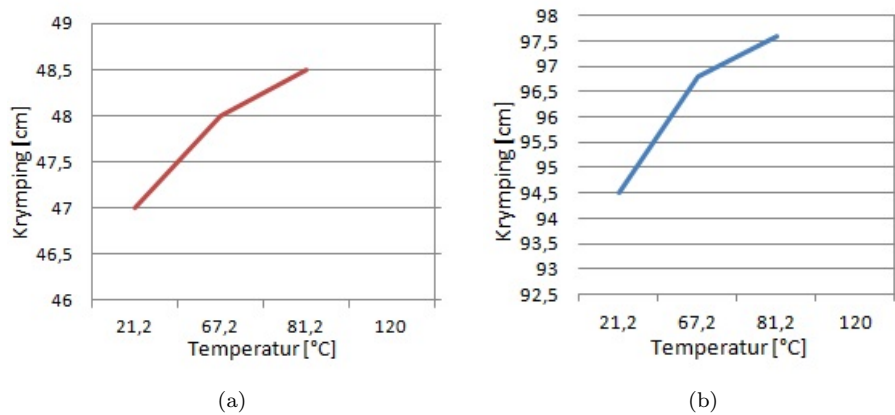
Tabell 3: Målt kabellengde etter uttrekking av kobberlederen med startlengder på 0,5 og 1,0 m

Tilstand	PEX-isolasjonens krymping ved uttrekking av kobberlederen						Totalt gjennomsnitt
	Kabelobjekt						
	1	2	3	4	5	6	
Startlengde 1 m	0.993 m	0.995 m	0.995 m	0.992 m	0.997 m	0.994 m	0.994 m
Startlengde 0.5 m	0.496 m	0.495 m	0.496 m	0.493 m	0.497 m	0.496 m	0.496 m
Gjennomsnittlig fjernet strekk	0.75 %	0.75 %	0.65 %	1.1 %	0.45 %	0.7 %	0.7 %

PEX-isolasjonens krymping ved nedkjøling fra 120 grader celsius

Figur 4.1 viser hvor mye PEX-isolasjonen krymper i aksial retning ved nedkjøling fra 120 °C til romtemperatur. Før den termiske behandlingen med oppvarming av kabelobjektet til 120 °C var startlengdene for måling 49,4 og 99,4 cm. Figur 4.1a og b viser at lengden er krympet til henholdsvis 47 og 94,5 cm ved nedkjøling til 21.2 °C. Dette tilsvarer en krymping på 4.9% for begge målepunktene.

Totalt vil PEX-isolasjonen til kabelen utsatt for varmebehandling ha krympet 5.6% i kabelens aksial retning med lederen trukket ut.



Figur 4.1: PEX-isolasjonens aksielle krymping som funksjon av temperatur ved startlengder på 49.4 cm (a) og 99.4 cm (b) ved nedkjøling fra 120 °C

4.2 Resultater fra forsøk med ubelastede kabler

Tabell 4 angir analysert isolasjonslengde for ventilerte vanntrær og bow-tie trær for hvert av de ubelastede kabelobjektene. Analysert isolasjonslengde som legger grunnlag for forekomst og gjennomsnittlig maksimal lengde av bow-tie trær kan være ulik i noen kabelobjekt. Alle resultatene untatt ett er fra kabler aldret med en spenning på $U = 2U_0$. Det er spesifisert der resultatet fra kablen med 25 kV påtrykt spenning presenteres.

Tabell 4: Analysert kabellengde for ubelastede kabler

Kabelobjekt	Spenning [kV]	Aldringstid [uker]	Analysert isolasjonslengde for ventilerte trær [mm]	Analysert isolasjonslengde for bow-tie trær [mm]	
				Forekomst	$l_{av,max}$
Referanse uten leder	14	3	40	40	40
Referanse med leder	14	3	40	20	60
Kabel med leder	25	3	40	0	40
Varmebehandlet kabel	14	3	40	40	40

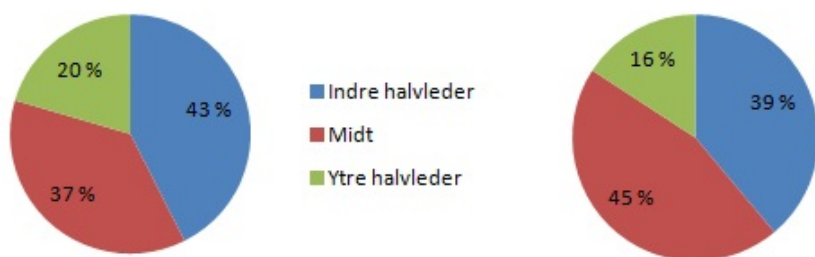
4.2.1 Fordeling og forekomst av vanntrær i isolasjonen

Figur 4.2 viser prosentvis fordeling og tettheten av registrerte bow-tie trær for ubelastede kabelobjekt i de tre inndelte sonene av kabelisolasjonen. Det kan ses av Figur 4.2a at en stor del av bow-tie trærne, hele 80%, er funnet i den indre og midtre delen av kabelisolasjonen for referansekabelen uten leder. Det er registrert flest bow-tie trær i området ved den indre halvledere, med 43%. Færrest bow-tie trær er registrert i området nær den ytre halvlederen, hvor bare 20% av trærne er funnet.

Figur 4.2b viser at 45% av de registrerte bow-tie trærne i referansekabelen med leder er funnet i midten av isolasjonen, og at det registreres få trær, 16%, i området nær den ytre halvlederen.

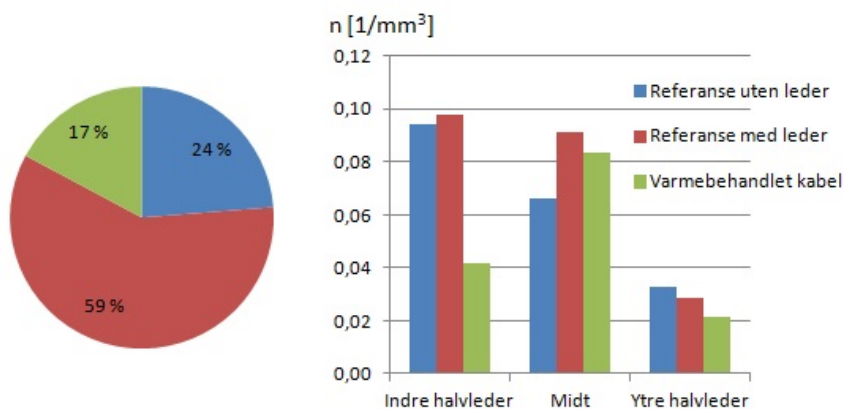
Det registreres også få bow-tie trær, 17%, i området ved den ytre halvlederen for kablen utsatt for varmebehandling, se Figur 4,2c. Det kan legges merke til at det registreres mye færre bow-tie trær i området nær den indre halvlederen, 24%, og at mesteparten av bow-tie trærne i den varmebehandlede kablen registreres i den midtre sonen av isolasjonen, med hele 59%.

Figur 4.2d viser tettheten av bow-tie trær per volumenhet i de tre inndelte sonene av isolasjonen, og er ment som en oppsummerende illustrasjon. En kan se at isolasjonsområdet ved den ytre halvlederen har lavest tetthet av bow-tie trær.



(a) Prosentvis fordeling av bow-tie trær i referansekabelen uten leder

(b) Prosentvis fordeling av bow-tie trær i referansekabelen med leder



(c) Prosentvis fordeling av bow-tie trær i varmebehandlet kabel

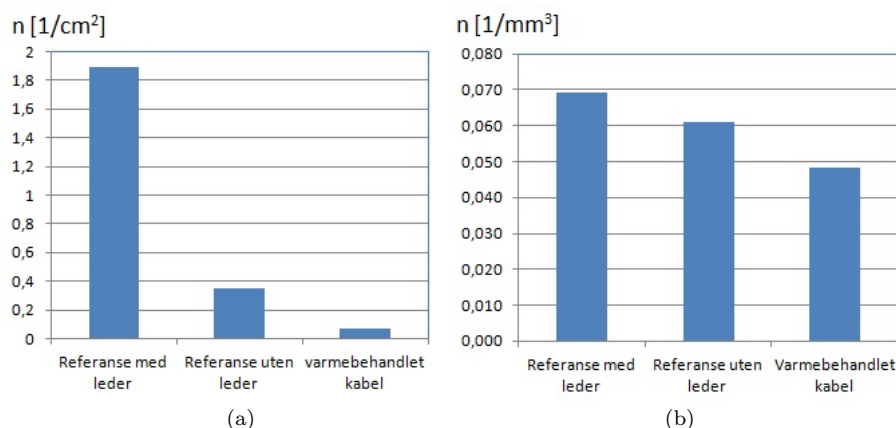
(d) Tettheten av bow-tie trær per volumenhet i de ulike områdene av kabelisolasjonen

Figur 4.2: Prosentvis fordeling og tettheten per volumenhet isolasjon av bow-tie trær i kabler aldret i 3 uker uten mekanisk belastning

Figur 4.3a viser forekomsten av ventilerte vanntrær per arealenheter isolasjon for de ubelastede kablene. Størst forekomst finnes i referansekabelen med lederen beholdt, med $n = 1,9$ trær per arealenheter. Forekomsten er over 5 ganger så stor i referansekabelen med leder som i referansekabelen uten leder. Lavest forekomst av ventilerte vanntrær er funnet i kablen utsatt for varmebehandling, med $n = 0,07$, som er 5 ganger lavere enn forekomsten i referansekabelen uten leder.

Forekomsten av ventilerte vanntrær ved ytre halvleder er ikke tatt med ettersom det bare er funnet 3, 3 og 0 trær i henholdsvis referanse med og uten leder og den varmebehandlede kabelen.

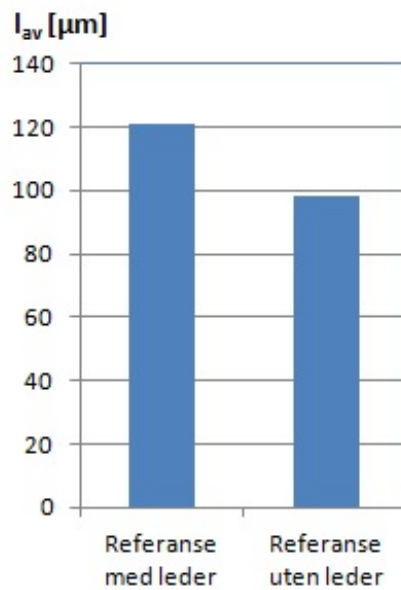
Figur 4.3b viser tettheten av bow-tie trær per volumenhet isolasjon. Størst tetthet av bow-tie trær fås i referansekabelen med lederen beholdt, hvor $n = 0,069$ trær per volumenhet. Lavest tetthet av bow-tie trær fås i den varmebehandlede kabelen, med $n = 0,048$. Det kan legges merke til at tettheten av bow-tie trær og forekomsten av ventilerte trær ser ut til å følge samme mønster, hvor forekomsten er størst i referansekabelen med leder og lavest i den varmebehandlede kabelen.



Figur 4.3: Forekomsten av ventilerte vanntrær per arealenhet isolasjon (a) og tettheten av bow-tie trær per volumenhet isolasjon (b) for ubelastede kabler aldret i 3 uker

4.2.2 Gjennomsnittlig lengde av ventilerte vanntrær

Figur 4.4 viser at den gjennomsnittlige langden av ventilerte vanntrær er 19% større i referansekabelen med leder enn i referansekabelen uten leder, med $l_{av} \approx 121 \mu\text{m}$ i referansen med leder og $l_{av} = 98,4 \mu\text{m}$ i referansen uten leder.

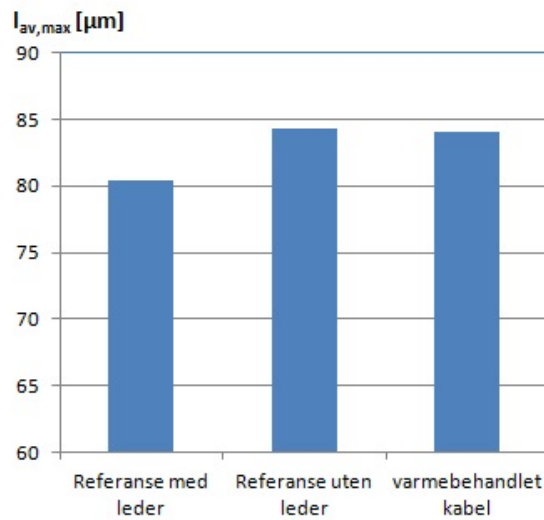


Figur 4.4: Gjennomsnittlig lengde av ventilerte vantrær for ubelastede kabler aldret i 3 uker

Gjennomsnittlig lengde av ventilerte vantrær for den varmebehandlede kabelen er ikke med i Figur 4.4 fordi det bare er funnet ett ventilert vantræ.

4.2.3 Gjennomsnittlig maksimal lengde av bow-tie trær

Gjennomsnittlig maksimal lengde, $\overline{l_{max}}$, av bow-tie trær for de ubelastede kablene vises i Figur 4.5. Den gjennomsnittlige maksimale lengden er tilnærmet den samme for referansekabelen uten leder og det varmebehandlede kabelobjektet, med $\overline{l_{max}} \approx 84 \mu\text{m}$. Den laveste verdien for gjennomsnittlig maksimal lengde fås i referansekabelen med leder, $\overline{l_{max}} = 80,4 \mu\text{m}$. Det er altså liten variasjon i den gjennomsnittlige maksimale lengden av bow-tie trær mellom de ubelastede kablene.



Figur 4.5: Gjennomsnittlig maksimal lengde av bow-tie trær for ubelastede kabler aldret i 3 uker

4.2.4 Estimerte verdier av maksimal lengde av bow-tie trær

Det er ved bruk av ekstremalverdistatistikk beregnet 5%, 50% og 95% sannsynlighet for at den maksimale lengden til bow-tie trær i en 1 meter lang kabel overstiger den gitte verdien av l_{max} . Tabell 5 viser de beregnede verdiene. Plottene til de kumulative sannsynlighetsfordelingene er vedlagt i Tillegg D, og informasjon om ekstremalverdistatistikk og hvordan den brukes finnes i Tillegg C.

Tabell 5: Parametere beregnet fra sannsynlighetsfordelingen i ligning 7 og korresponderende 5%, 50% og 95% sannsynlighet for at den maksimale lengden til bow-tie trær i en 1 meter lang kabel overstiger den gitte verdien av l_{max} for ubelastede kabler

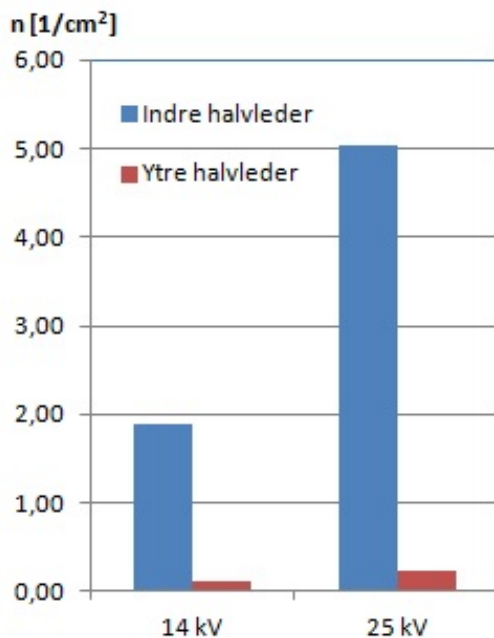
Type kabel	Aldringstid [uker]	v [μm]	β	l_{max} [μm] i en 1 m lang kabel		
				95 %	50 %	5 %
Referanse uten leder	3	118	116,7	200,5	256,6	354,6
Referanse med leder	3	125,2	220,7	160,7	190,7	243,5
Varmebehandlet kabel	3	133	105,7	223,8	285,3	392,8

Den estimerte verdien av l_{max} er størst i den varmebehandlede kabelen, med $\varphi=0,95$. De estimerte verdiene med $\varphi=0,95$ utgjør 3,4 - 4,8% av isolasjonstykkelsen.

Forekomsten av ventilerte vanntrær i den analyserte isolasjonslengden er for lav til at sannsynlighetsfordelingen i ligning 7 kan benyttes, og det er derfor ikke gjort noe estimat på den maksimale lengden til ventilerte vanntrær.

4.2.5 Sammenligning av vanntrevekst ved indre og ytre halvleder

Figur 4.6 viser forekomsten av ventilerte vanntreer per arealenhet isolasjon ved indre og ytre halvleder for kabelobjekt med leder aldret med 14 og 25 kV påtrykt spenning i 3 uker. Med en spenning på 25 kV vil den elektriske feltstyrken ved ytre halvleder være lik den elektriske feltstyrken ved den indre halvlederen for 14 kV aldring. Av figuren kan en se at forekomsten av ventilerte vanntreer ved ytre halvleder med 25 kV er mer enn 8 ganger lavere enn forekomsten ved indre halvleder med 14 kV påtrykt spenning. Det er altså mye lavere forekomst av ventilerte vanntreer fra den ytre halvlederen sammenlignet med den indre halvlederen med lik elektrisk feltstyrke. Det kan også ses at forekomsten av ventilerte vanntreer er mye større med påtrykk av 25 kV.



Figur 4.6: Forekomst av ventilerte vanntreer per arealenhet ved indre og ytre halvleder for kabelobjekt med leder aldret i 3 uker ved ulik spenning

4.3 Resultater fra forsøk med mekanisk belastning

Tabell 6 viser analysert isolasjonslengde for vanntreer i kabler utsatt for statisk og dynamisk mekanisk belastning på den mekaniske testtriggen. Alle resultatene er fra kabelobjekter aldret med en spenning på $U = 2U_0$.

Tabell 6: Analysert isolasjonslengde for mekanisk belastede kabler

Kabelobjekt	Spenning [kV]	Aldringstid [uker]	Analysert isolasjonslengde for ventilerte trær[mm]	Analysert isolasjonslengde for bow-tie trær[mm]	
				Forekomst	$l_{av,max}$
Statisk $\epsilon=1\%$, $f=0$ Hz	14	3	40	40	40
Dynamisk $\epsilon=1\%$, $f=0.1$ Hz	14	3	40	40	40
Dynamisk $\epsilon=1\%$, $f=1.0$ Hz	14	3	70	40	70
Dynamisk $\epsilon=1\%$, $f=0.1$ Hz	14	4	70	40	70
Dynamisk $\epsilon=1\%$, $f=1.0$ Hz	14	4	70	40	70

4.3.1 Vanntrevekst i statisk og dynamisk mekanisk belastede kabler sammenlignet med ubelastede

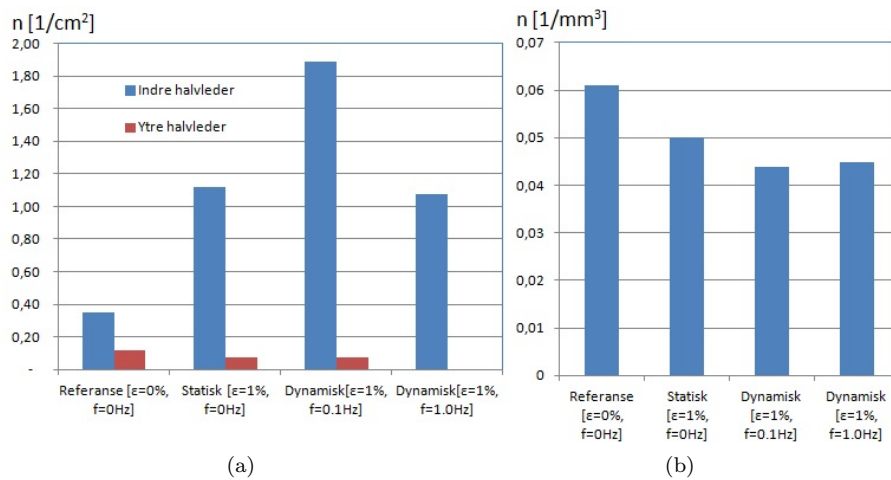
Referansekabelen uten leder er den som benyttes til sammenligning i figurene, ettersom kablene utsatt for mekanisk belastning ikke har ledere. Ved å sammenligne vanntreveksten i belastede kabler med vanntreveksten i ubelastede kabler kan det avgjøres om belastningen påvirker vanntreveksten.

Forekomsten av vanntrær

Figur 4.7a viser at forekomsten av ventilerte vanntrær er størst, med $n= 1,89$ trær per arealenhet, i kabelen som er utsatt for dynamisk mekanisk belastning av motoren med frekvens 0,1 Hz. Referansekabelen har lavest forekomst med $n= 0,35$ trær per arealenhet. Sammenlignet med referansen er forekomsten av ventilerte vanntrær mer enn 5,4 ganger større i kabelen aldret med dynamisk mekanisk belastning med $f= 0.1$ Hz, og 3,2 ganger større i den statisk mekanisk belastede kabelen. Det kan også ses at forekomsten av ventilerte vanntrær er omtrent lik som for det statiske kabelobjektet i kabelen aldret med dynamisk mekanisk belastning $f= 1.0$ Hz.

Forekomsten av ventilerte vanntrær ved den ytre halvlederen er liten til sammenligning med forekomsten av ventilerte vanntrær ved indre halvleder. Størst forekomst er funnet i referansekabelen, med $n= 0,11$ trær per arealenhet isolasjon, og en kan se at forekomsten er konstant på et lavt nivå i de mekanisk belastede kablene.

Figur 4.7b viser at tettheten av bow-tie trær er størst i referansekabelen, med $n= 0,061$ trær per volumenhet isolasjon. Lavest tetthet av bow-tie trær finnes i kabelene utsatt for dynamisk mekanisk belastning $f=0.1$ Hz og $f=1.0$ Hz, med henholdsvis $n= 0,044$ og $n= 0,045$ trær per volumenhet. Det kan observeres at det ikke er noen stor forskjell i tettheten av bow-tie trær mellom de mekaniske kabelobjektene.

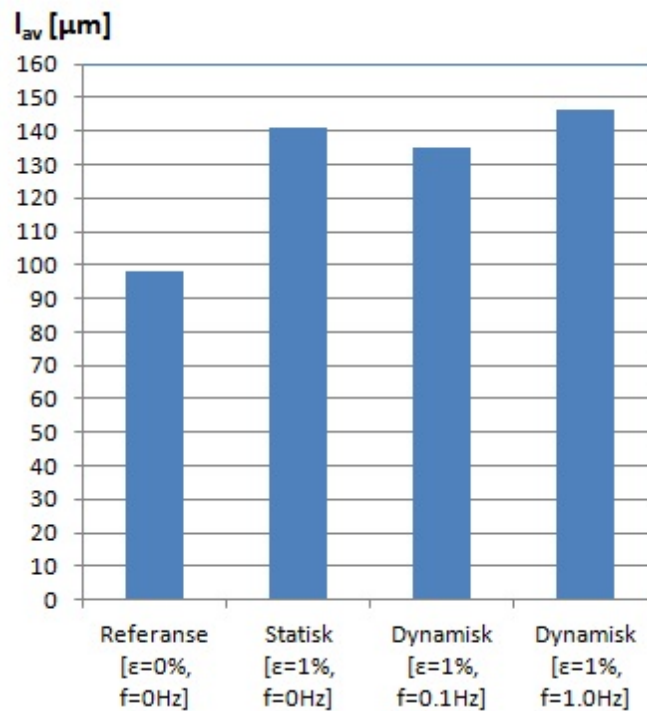


Figur 4.7: Forekomsten av ventilerte vanntrær per arealenheter (a) og tettheten av bow-tie trær per volumenhet (b) etter 3 uker aldring

Gjennomsnittlig lengde av ventilerte vanntrær

Figur 4.8 viser at den gjennomsnittlige lengden for ventilerte vanntrær er størst i kabelen aldring med dynamisk mekanisk belastning $f=1.0$ Hz, hvor $l_{av} = 146,4 \mu\text{m}$. Lavest gjennomsnittlig lengde for ventilerte vanntrær fås i den ubelastede referansekabelen, hvor $l_{av} = 98,4 \mu\text{m}$. Gjennomsnittslengden er mellom 27,2 - 32,8% større i de mekanisk belastede kabelen sammenlignet med referansekabelen. Det er ingen signifikant forskjell i den gjennomsnittlige lengden av ventilerte vanntrær mellom de mekaniske kablene.

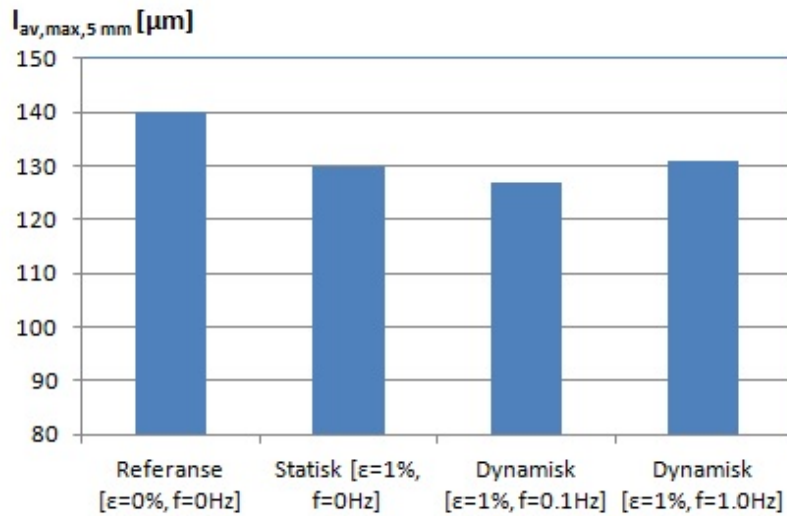
Gjennomsnittlig lengde av ventilerte vanntrær ved ytre halvleder er ikke vektlagt grunnet lav forekomst. Det er bare funnet 2 trær i den dynamisk mekanisk belastede kabelen med frekvens 0,1 Hz og 2 trær i den statisk mekanisk belastede kabelen. Ingen ventilerte vanntrær er funnet ved ytre halvleder for dynamisk mekanisk belastet kabel med frekvens 1,0 Hz.



Figur 4.8: Gjennomsnittlig lengde av ventilerte vantrær i kabler aldret i 3 uker

Gjennomsnittlig maksimal lengde av bow-tie trær

Gjennomsnittlig maksimal lengde per 5 mm isolasjon, $\overline{l_{max,5mm}}$, er en gjennomsnittsverdi basert på det lengste bow-tie treet per 5 mm isolasjon. Figur 4.9 viser at størst verdi for den gjennomsnittlige maksimale lengden per 5 mm isolasjon er funnet i referansekabelen, hvor $\overline{l_{max,5mm}} = 140 \mu\text{m}$, med et standardavvik $\sigma = 29,6 \mu\text{m}$. Den gjennomsnittlige maksimale lengdene per 5 mm isolasjon er forholdsvis lik for de mekanisk belastede kablene, med verdier for $\overline{l_{max,5mm}}$ på mellom 127 og 131 μm . Standardavviket for verdiene er mellom 23,6 og 25 μm .



Figur 4.9: Gjennomsnittlig maksimal lengde per 5 mm isolasjonslengde av bow-tie trær i kabler aldret i 3 uker

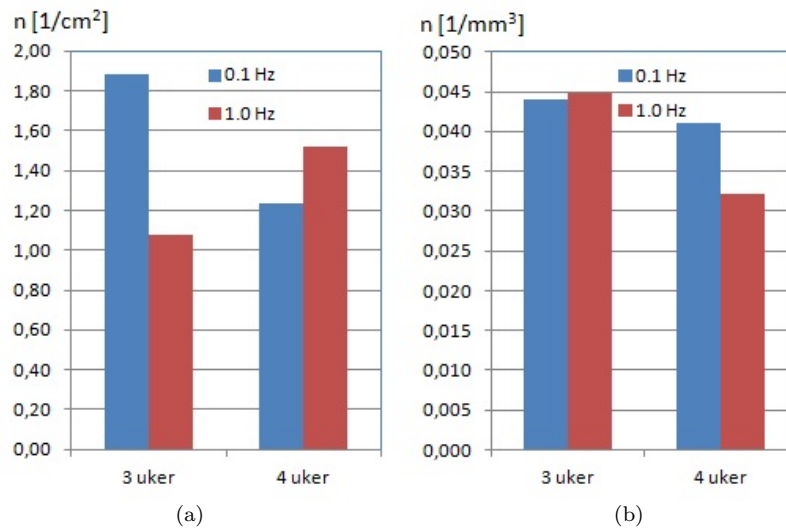
4.3.2 Sammenligning av vanntrevekst i dynamisk mekanisk belastede kabler aldret ved ulike frekvenser

Forekomsten av vanntrær

Figur 4.10a viser forekomsten av ventilerte vanntrær etter 3 og 4 ukers aldring for kabelobjekt med ulike dynamiske mekaniske belastninger, $f=0.1\text{ Hz}$ og $f=1.0\text{ Hz}$. Ved 3 ukers aldring kan en se at det er størst forekomst av ventilerte vanntrær i kabelen belastet med frekvens 0.1 Hz , hvor $n=1.89$ trær per arealenhed. Forekomsten ved 0.1 Hz er da nesten dobbelt så stor som for kabelen belastet dynamisk mekanisk med frekvens 1.0 Hz , hvor $n=1.08$. For kablene som er aldret i 4 uker er forekomsten størst i kabelen belastet med dynamisk mekanisk belastning $f=1.0\text{ Hz}$, med $n=1.52$. Forekomsten i kabelen belastet dynamisk mekanisk med en frekvens på 0.1 Hz er $n=1.24$. Det er altså ingen stor forskjell i forekomsten av ventilerte vanntrær per arealenhed for kablene aldret i 4 uker ved ulike frekvenser.

Det skal legges til at det er brukt en annen fargeblanding med metylenblått for kabelobjektet med høyest forekomst av ventilerte vanntrær, og samme fargeblanding for kablene aldret i 4 uker.

Figur 4.10b viser at tettheten av bow-tie trær er tilnærmet lik for 0.1 og 1.0 Hz dynamisk mekanisk belastning ved 3 ukers aldring, med $n=0.044$ og $n=0.045$ trær per volumenhet. Ved 4 ukers aldring er tettheten av bow-tie trær størst i 0.1 Hz kabelobjektet og lavest i 1.0 Hz kabelobjektet, med henholdsvis $n=0.041$ og $n=0.032$ trær per volumenhet.

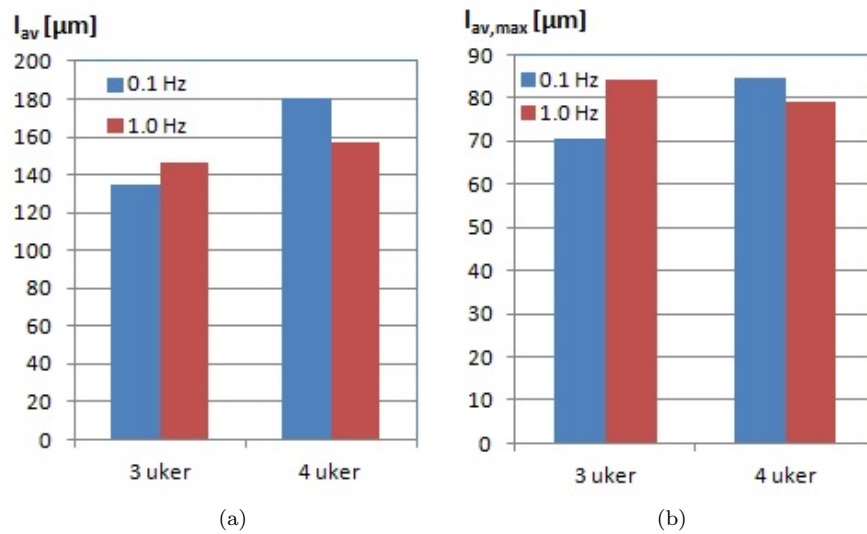


Figur 4.10: Forekomst av ventilerte vantrær per arealenheter isolasjon (a) og tetthet av bow-tie trær per volumenheter isolasjon (b) i kabler aldret med 0,1 og 1,0 Hz dynamisk mekanisk belastning i 3 og 4 uker

Gjennomsnittlig lengde av vantrær

Figur 4.11a viser at størst gjennomsnittlig lengde, $l_{av} = 146,4 \mu\text{m}$, av ventilerte vantrær ved 3 ukers aldring fås i kabelen utsatt for dynamisk mekanisk belastning $f = 1,0 \text{ Hz}$. Den gjennomsnittlige lengden er litt lavere, $l_{av} = 135,2 \mu\text{m}$, i kabelen utsatt for 0.1 Hz dynamisk mekanisk belastning. Ved 4 ukers aldring er den gjennomsnittlige lengden av ventilerte vantrær størst i kabelen med dynamisk mekanisk belastning på 0.1 Hz og lavest ved 1.0 Hz dynamisk mekanisk belastning, med henholdsvis $l_{av} = 180,8 \mu\text{m}$ og $l_{av} = 157,6 \mu\text{m}$.

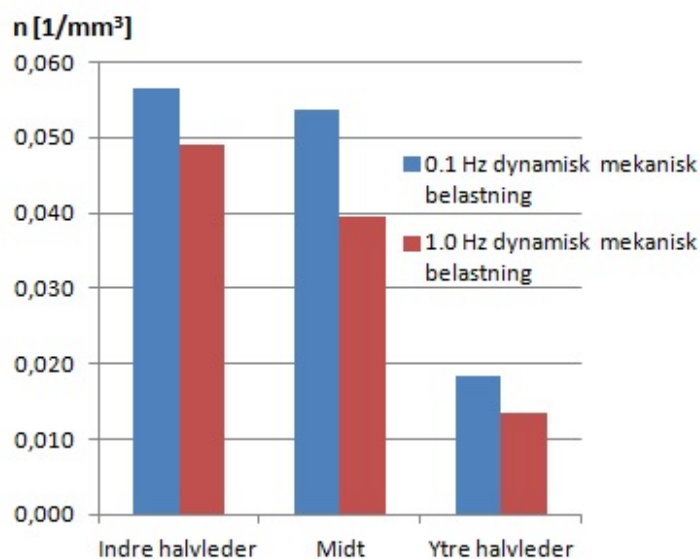
Størst gjennomsnittlig maksimal lengde av bow-tie trær ved 3 ukers aldring fås i kabelen utsatt for dynamisk mekanisk belastning $f = 1,0 \text{ Hz}$, hvor $\overline{l_{max}} = 84 \mu\text{m}$. Den gjennomsnittlige maksimale lengden er noe lavere, $\overline{l_{max}} = 70,4 \mu\text{m}$, for kabelen med 0.1 Hz dynamisk mekanisk belastning, se Figur 4.11b. For kablene som er aldret i 4 uker er den gjennomsnittlige maksimale lengden størst i kabelen med dynamisk mekanisk belastning $f = 0,1 \text{ Hz}$, med $\overline{l_{max}} = 84,8 \mu\text{m}$, og lavest for dynamisk mekanisk belastning $f = 1,0 \text{ Hz}$, hvor $\overline{l_{max}} = 79,2 \mu\text{m}$.



Figur 4.11: Gjennomsnittlig lengde av ventilerte vanntrær (a) og gjennomsnittlig maksimal lengde av bow-tie trær (b) i kabler aldret med 0,1 og 1,0 Hz dynamisk mekanisk belastning i 3 og 4 uker

4.3.3 Fordelingen av bow-tie trær i isolasjonen for dynamisk mekanisk belastede kabler aldret i 4 uker

Figur 4.12 viser tettheten av bow-tie trær i hver av de tre inndelte isolasjonsområdene for kabler belastet dynamisk mekanisk i 4 uker. Det kan ses at tettheten av bow-tie trær er lavest i området ved den ytre halvlederen for begge kablene. Størst tetthet av bow-tie trær fås i kabelens midtre og indre sone.



Figur 4.12: Tettheten av bow-tie trær per volumenhet i de 3 inndelte isolasjonsområdene for kabler aldret i 4 uker med 0,1 og 1,0 Hz dynamisk mekanisk belastning

4.3.4 Estimerte verdier av maksimal lengde av bow-tie trær

Ved bruk av ekstremalverdistatistikk er verdiene i Tabell 7 beregnet. Plottene til de kumulative sannsynlighetsfordelingene finnes i Tillegg D.

Tabell 7: Parametere beregnet fra sannsynlighetsfordelingen i ligning 7 og korresponderende 5%, 50% og 95% sannsynlighet for at den maksimale lengden av bow-tie trær i en 1 meter lang kabel overstiger den gitte verdien av l_{max} for mekanisk belastede kabler

Type kabel	Aldringstid [uker]	v [μm]	β	lmax [μm] i en 1 m lang kabel		
				95 %	50 %	5 %
[$\epsilon=1,0\%$, $f=0$ Hz] Statisk	3	124	194,9	173,6	207,4	267,1
[$\epsilon=1,0\%$, $f=0,1$ Hz] Dynamisk	3	123,9	225,4	166,7	196,1	247,8
[$\epsilon=1,0\%$, $f=1,0$ Hz] Dynamisk	3	113,8	107,2	180,2	241,5	348,5
[$\epsilon=1,0\%$, $f=0,1$ Hz] Dynamisk	4	123,7	69	226,1	319,9	482,1
[$\epsilon=1,0\%$, $f=1,0$ Hz] Dynamisk	4	120,2	204,4	155,1	187,5	244,7

Den estimerte verdien av l_{max} er størst i den dynamisk mekanisk 0,1 Hz belastede kabelen aldret i 4 uker og lavest i den dynamisk mekaniske 1,0 Hz belastede

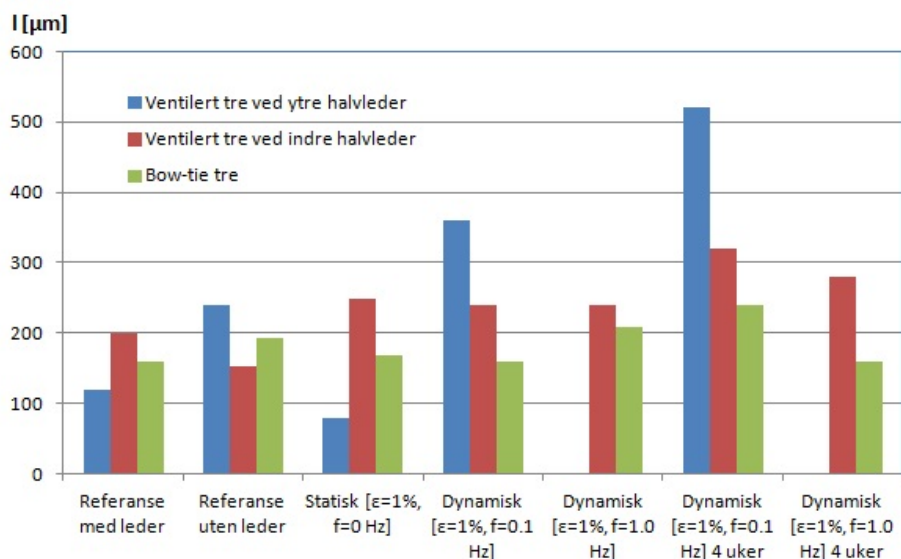
kabelen aldrer i 4 uker, med $\varphi = 0,95$. Sammenlignet med kabelens isolasjonstykkelser utgjør de estimerte verdiene 3,3 - 4,8% av isolasjonstykkelser, beregnet med $\varphi = 0,95$.

Forekomsten av ventilerte vanntrær er også i dette tilfellet for lav til å få verdier som kan plottes i en kumulativ sannsynlighetsfordeling.

4.4 Lengste vanntreet i den analyserte isolasjonslengden

Det kan ses av Figur 4.13 at det lengste ventilerte vanntreet i den analyserte isolasjonslengden finnes i kabelen utsatt for dynamisk mekanisk belastning $f = 0.1$ Hz i 4 uker. Dette vanntreet vokser fra den ytre halvlederen og er $520 \mu\text{m}$ langt. I den samme kabelen er også det lengste ventilerte vanntreet fra indre halvleder og det lengste bow-tie treet funnet. Det lengste ventilerte vanntreet fra indre halvleder er $320 \mu\text{m}$ langt, mens det lengste bow-tie treet er $240 \mu\text{m}$.

De lengste vanntrærne utgjør 5-11% av kabelens isolasjonstykkelser.

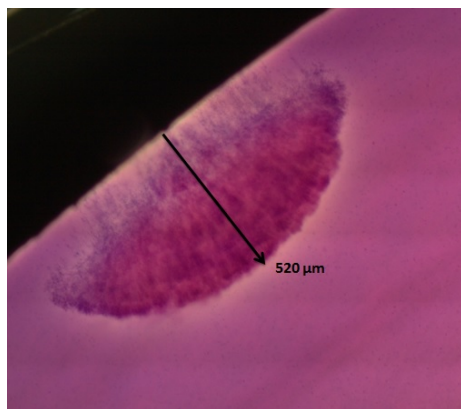


Figur 4.13: Lengste vanntrær funnet i den analyserte isolasjonslengden

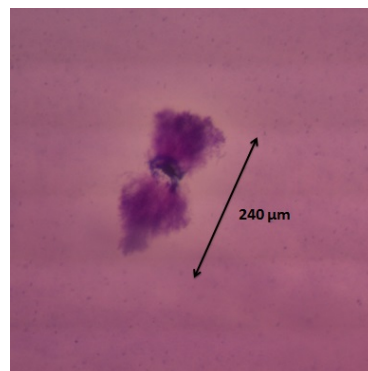
Den varmebehandlede kabelen er ikke tatt med i Figur 4.13, men det lengste ventilerte vanntreet fra indre halvleder er $280 \mu\text{m}$ og det lengste bow-tie treet er $200 \mu\text{m}$. Det er ingen ventilerte vanntrær fra den ytre halvlederen.

Figur 4.14a viser det lengste ventilerte vanntreet funnet i den analyserte isolasjonslengden.

Det lengste bow-tie treet funnet i den analyserte isolasjonslengden er vist i Figur 4.14b.



(a) 520 μm langt ventilert vanntre som vokser fra ytre halvleder i den 0,1 Hz dynamisk mekanisk belastede kabelen etter 4 ukers aldring



(b) 240 μm langt bow-tie tre som vokser i midten av isolasjonstykkelsen i den 0,1 Hz dynamisk mekanisk belastede kabelen etter 4 ukers aldring

Figur 4.14: Lengste ventilerte vanntre og bow-tie tre i den analyserte isolasjonslengden

4.5 Feilkilder

Ideelt sett er det slik at alle spiralene bør farges inn i samme fargeblanding når vanntreveksten skal sammenlignes. Innfargingen kan være av forskjellig kvalitet fra gang til gang, og det er derfor vanskelig å få akkurat samme farge i to ulike blandinger. Dersom fargeblandingen er veldig mørk eller lys kan det være spesielt krevende å få med alle bow-tie trær. Innfargingen får derfor størst betydning for resultatet når det gjelder forekomst og fordeling av bow-tie trær i isolasjonen. For å eliminere denne usikkerheten er det forsøkt å farge de kablene som skal sammenlignes med hverandre i samme fargeblanding, slik som kablene utsatt for dynamisk mekanisk belastning ved ulike frekvenser etter 4 uker. Det var dog uungåelig å ikke bruke ulike fargeblandinger i sammenligningen av vanntreveksten i mekanisk belastede kabler kontra ubelastede kabler.

For kabelobjekt hvor lederen ble trukket ut kan prosessen ha skapt slitasje i lederkanalen og på denne måten innført initieringspunkter for vanntre ved den indre halvlederen. Dette er gjeldende for alle kabelobjektene uten leder. Det anses som lite sannsynlig at uttrekkingsprosessen får noen særlig påvirkning på resultatene.

5 Diskusjon

I dette kapitlet diskuteres resultatene opp mot hypotesen, teori, metode og tidligere forsøk. Ventilerte vanntrær ved indre halvleder vil også i dette kapitlet omtales som ventilerte vanntrær, da forekomsten av ventilerte vanntrær ved ytre halvleder er insignifikant sammenlignet med forekomsten av ventilerte vanntrær ved indre halvleder. Det spesifiseres dersom ventilerte vanntrær fra ytre halvleder diskuteres.

5.1 Ubelastede kabler

5.1.1 Innfryste krefters påvirkning på vanntreveksten

Teorien i delkapittel 2.4 forklarer hvordan det lagres innfryste strekkrefter i den indre delen av isolasjonen og kompresjonskrefter i den ytre delen av isolasjonen allerede fra produksjonsprosessen. Strekkreftene dannes som et resultat av at lederen, med sin lave ekspansjonsevne, hindrer PEX i å krympe til sitt likevektspunkt. Tidligere forsøk har vist at kompresjonskrefter reduserer vanntreveksten, mens strekkrefter akselererer vanntreveksten[13]. I hypotesen i delkapittel 1.4 antas det at en del av de innfryste strekkreftene som oppstår nær lederen vil opphøre når lederen fjernes, og dermed resultere i lavere vanntrevekst. Dette begrunnes med at PEX-isolasjonen vil forsøke å krympe til sitt likevektspunkt. Resultatet i Figur 4.3a styrker hypotesen. Det kommer frem at forekomsten av ventilerte vanntrær er over 5 ganger så stor i referansekabelen med ledern beholdt sammenlignet med referansekabelen uten leder. Resultatet indikerer at det dannes strekkrefter i den indre isolasjonen under produksjonsprosessen. Dette styrkes også av resultatet i Tabell 3 som viser at en kan redusere de innfryste strekkreftene i aksial retning med 0,7% ved å fjerne lederen. Det legges merke til at fjernet strekk kan være i størrelsesorden med de eksternt påførte mekaniske strekkreftene på 1%. Dette blir diskutert og sammenlignet i delkapittel 5.2.1.

Det ble i hypotesen også antatt at en kabel uten leder som varmes opp til 120 °C og deretter nedkjøles gradvis til romtemperatur vil krympe. Innfryste strekkrefter som ville blitt dannet nær lederen grunnet rask nedkjøling og forskjellen i ekspansjonsevne for kobber og PEX, ble antatt å opphøre. Redusert vanntreveksten ble forventet som følge av dette. Resultatet i Figur 4.3a styrker også denne hypotesen. Forekomsten av ventilerte vanntrær er 5 ganger lavere i den varmebehandlede kabelen sammenlignet med referansekabelen uten leder og 10 ganger lavere enn referansekabelen med leder. Resultatet dokumenterer at betydlige strekkrefter er fjernet ved varmebehandling. Figur 4.1 indikerer en krymping av isolasjonen på hele 4,9% i aksial retning for kabelen utsatt for varmebehandling. Grunnet de viskoelastiske egenskapene til PEX kan dermed den varmebehandlede kabelen med uttrekt leder ha fått fjernet omtrent 5,6% av strekkreftene totalt. Resultatet belyser at det kan ha blitt dannet strekkrefter ved produksjonsprosessen som er i størrelsesorden med det fjernede strekket. Strekkreftene i isolasjonen nær lederen er dermed dokumentert å gi en signifikant økning i vanntreveksten.

Det styrker også hypotesen at tettheten av bow-tie trær, se Figur 4.3b, er størst i referansekabelen med leder og lavest i den varmebehandlede kabelen.

Resultatene i Figur 4.2 viser at det er registrert langt færre bow-tie trær i den ytre delen av isolasjonen enn i midten og den indre isolasjonssonen. For referansekabelen med og uten leder og den varmebehandlede kabelen er bare mellom 16-20% av de registrerte bow-tie trærne funnet i det ytre isolasjonsområdet, se Figur 4.2a-c. Forekomsten av ventilerte vanntreer ved den ytre halvlederen for de ubelastede kablene er også veldig lav, se delkapittel 4.2.1. Dette kan skyldes at de innfrosne strekkreftene akselererer vanntreveksten i de indre isolasjonsområdene, og at vanntrevekst på denne måten blir lavere i området nær den ytre halvlederen. Kompresjonskreftene som dannes i radiell retning i den ytre isolasjonsoverflaten kan også tenkes å påvirke resultatet, ved å hindre vanntreveksten. Det kan her argumenteres med at den lave tettheten av bow-tie trær i området nær den ytre halvlederen, vist i figur 4.2d, skyldes at det elektriske feltet er 1,8 ganger lavere i den ytre isolasjonssonen enn ved den indre halvlederen. Resultatet i Figur 4.6 indikerer at et lavere elektrisk felt ikke er den dominante effekten. Figuren sammenligner forekomsten av ventilerte vanntreer ved indre og ytre halvleder når de opplever det samme elektriske feltet. Ved lik elektrisk feltstyrke er forekomsten av ventilerte vanntreer over 8 ganger større ved den indre halvlederen sammenlignet med den ytre halvlederen. Det er dermed funnet at strekk- og kompresjonskrefter er den dominante effekten. Den lave tettheten av bow-tie trær i den ytre isolasjonssonen sammenlignet med det indre isolasjonsområdet antas derfor å skyldes at kompresjonskrefter virker mot Maxwell-kreftene mens strekkreftene virker med Maxwell-kreftene.

Det kan ses av Figur 4.2d at tettheten av bow-tie trær i området ved den indre halvlederen er markant lavere i den varmebehandlede kabelen sammenlignet med referansekablene med og uten leder. Dette kan skyldes at strekkrefter i området ved den indre halvlederen er fjernet etter varmebehandlingen, som fører til redusert tettheten av bow-tie trær i den indre isolasjonssonen. Resultatet stemmer godt overens med hypotesen og de nevnte resultater.

Resultatet i Figur 4.4 synliggjør at den gjennomsnittlige lengden av ventilerte vanntreer er større i referansekabelen med leder sammenlignet med referansen uten leder. Den gjennomsnittlige lengden er nesten 19% større i referansekabelen med leder. Det kan ikke sies hvorvidt den gjennomsnittlige lengden av ventilerte vanntreer i den varmebehandlede kabelen er lavere sammenlignet med referansekabelen uten leder, ettersom det bare er funnet ett ventilert vanntre. Innfrosne strekkrefter virker å kunne gi en økning i lengden av ventilerte vanntreer.

Resultatet i Figur 4.5 viser at det ikke er noen signifikant forskjell i den gjennomsnittlige maksimal lengde, $\overline{l_{max}}$, av bow-tie trær i de ubelastede kablene. De innfrosne kreftene er dermed funnet å ikke påvirke lengden av bow-tie trær.

5.2 Statisk og dynamisk mekanisk belastede kabler

5.2.1 Statisk og dynamisk mekanisk belastede kabler sammenlignet med ubelastede

Resultatene i Figur 4.7a dokumenterer at mekanisk belastede kabler med strekk på 1% har signifikant større forekomst av ventilerte vanntrær sammenlignet med ubelastede kabler uten leder. Forekomsten av ventilerte vanntrær er 3-5 ganger større i de mekanisk belastede kablene.

Det kan også ses i Figur 4.7a at forekomsten av ventilerte vanntrær fra den ytre halvlederen er mye lavere enn forekomsten ved indre halvleder, da særlig for de mekanisk belastede kablene. Det er også lite variasjon i forekomsten ved den ytre halvlederen mellom de ulike kablene, og forekomsten ser ut til å ikke påvirkes av den mekaniske belastningen. Når det gjelder at forekomsten er mindre ved den ytre halvlederen sammenlignet med den indre halvlederen kan det som sagt tenkes at dette skyldes et lavere elektrisk felt. Reduksjonen i den elektriske feltstyrken ved ytre halvleder kan tenkes å være avgjørende ved at det gir reduksjon i Maxwell-krefter, se ligning 2, slik at sprekker og små hulrom i isolasjonen ved den ytre halvlederen opplever mindre krefter per arealenheter. Men som sagt viser resultatet i Figur 4.6 at det er de innfryste strekk- og kompresjonskreftene som er den dominante effekten. Med bakgrunn i resultatene kan det virke som kompresjonskreftene hindrer vannvekst ved ytre halvleder selv om kablene belastes mekanisk, og at de eksternt påkjente strekkreftene blir neglisjerbare i forhold.

Når det gjelder tettheten av bow-tie trær, vist i Figur 4.7b, ser en at veksten ikke lar seg påvirke av mekanisk strekk på 1%. Størst tetthet av bow-tie trær ble registrert i den ubelastede kabelen, med $n = 0,061$ trær per volumenhet.

Det ble i hypotesen også antatt at de innfryste strekkreftene i en kabel med lederen beholdt vil være større enn de som påkjennes isolasjonen eksternt i de mekaniske kablene. Det ble antatt at strekkreftene som dannes under produksjonsprosessen er vel så viktige som problematikken rundt statisk og dynamisk mekanisk strekk på kabler, ettersom eksternt påkjent mekanisk strekk er begrenset av kobberlederens flytgrense. Resultatet i Figur 4.7a og Figur 4.6 styrker hypotesen ved at forekomsten av ventilerte vanntrær i referansekabelen med leder er like stor eller større enn forekomsten i de mekanisk belastede kablene. Forekomsten av ventilerte vanntrær er omtrent lik i referansekabelen med leder og kabelen belastet dynamisk mekanisk med $f = 0,1$ Hz. Et interessant resultat er at forekomsten i referansekabelen med leder er 1,7 ganger større sammenlignet med den statisk mekanisk belastede kabelen og kabelen med dynamisk mekanisk belastning på 1,0 Hz. Resultatet belyser at de innfryste strekkreftene som dannes under produksjonsprosessen kan få større betydning for vannveksten enn de eksternt påførte strekkreftene, da særlig med tanke på at eksternt påført strekk på 1% er høyere enn det kabler vil kunne utsettes for.

Resultatet i Figur 4.8 viser en økning i gjennomsnittlig lengde av ventilerte vanntrær i kabler aldret med mekanisk påkjenning sammenlignet med en ubelastet kabel uten leder. Den gjennomsnittlige lengden er mellom 27,2 - 32,8% større i de mekanisk belastede kablene. Verdien for den gjennomsnittlige lengde

den for referansekabelen er basert på et mye mindre antall trær enn de mekanisk belastede kablene, og sammenligningen av verdiene blir noe usikker. Tidligere eksperimenter med mekanisk strekk på 6% dokumenterte en signifikant økning i gjennomsnittlig maksimal lengde av ventilerte vanntreer sammenlignet med ubelastet kabel[16].

Ved å sammenligne den gjennomsnittlige lengden av ventilerte vanntreer i den ubelastede referansekabelen med leder med mekanisk belastede kabler, se Figur 4.4 og Figur 4.8, kan en se at l_{av} nesten er i størrelsesorden med den gjennomsnittlige lengden i de mekanisk belastede kablene. Dette gir enda en indikasjon på at innfryste strekkrefter kan være et like viktig problem som ekstern mekanisk belastning.

Gjennomsnittlig maksimal lengde per 5 mm isolasjonslengde, $\overline{l_{max,5mm}}$, for bow-tie trær er presentert i Figur 4.9. Det kommer frem at mekanisk belastning på 1% ikke gir økning i $\overline{l_{max,5mm}}$ av bow-tie trær. Resultatet samsvarer med tidligere forsøk som dokumenterer at et mekanisk strekk på 6% ikke gir økning i gjennomsnittlig maksimal lengde av bow-tie trær[16]. Størt gjennomsnittlig maksimal lengde per 5 mm isolasjon fås i referansekabelen uten leder, og det er liten variasjon i $\overline{l_{max,5mm}}$ for de ulike mekanisk belastede kablene. Standardavviket for de beregnede verdiene av $\overline{l_{max,5mm}}$ er mer eller mindre lik i de mekaniske kablene, og forteller at spredningen av verdiene ikke skiller seg ut i noen av kablene. Dette gjør resultatene mer pålitelige.

5.2.2 Dynamisk mekanisk belastning av kabler sammenlignet med statisk mekanisk belastning

I hypotesen i delkapittel 1.4 ble det antatt at kabler med dynamisk mekanisk belastning vil ha større vanntrevekst sammenlignet med kabler aldret med statisk mekanisk belastning. Ut fra resultatene i Figur 4.7a kan det ikke dokumenteres om vanntreveksten er større i de dynamisk mekaniske kablene. Forekomsten av ventilerte vanntreer er tilnærmet 1,7 ganger større i kabelen utsatt for dynamisk mekanisk strekk med en frekvens på 0,1 Hz sammenlignet med den statisk mekanisk belastede kabelen. Forekomsten av ventilerte vanntreer er derimot lik som i den statisk mekanisk belastede kabelen for kabelen aldret med dynamisk mekanisk belastning på 1,0 Hz. Dette gjør at det ikke er noe grunnlag for å si om dynamisk mekanisk belastning påvirker vanntreveksten anderledes enn statisk mekanisk belastning.

Det er heller ingen forskjell i den gjennomsnittlige maksimale lengden per 5 mm isolasjon mellom statisk og dynamisk mekanisk belastede kabler, se Figur 4.9.

5.2.3 Dynamisk mekanisk belastede kabler aldret ved ulik frekvens

Det ble i hypotesen i delkapittel 1.4 antatt at frekvensen til den mekaniske belastningen på kabelen ville ha betydning på vanntreveksten, hvor økt frekvens gir økt vanntrevekst. Antagelsen er basert på at kabelisolasjonen vil utsettes for en større slitasje når den belastes med strekkrefter med høy frekvens i forhold til en kabel som belastes med lav frekvens. I denne oppgaven ble det altså

forventet størst vanntreveksten i kabelen utsatt for dynamisk mekanisk strekk med motoren som har en frekvens $f=1,0$ Hz.

Figur 4.10a viser at forekomsten av ventilerte vanntrær er nesten dobbelt så stor med en dynamisk mekanisk belastning på 0,1 Hz sammenlignet med en frekvens på 1,0 Hz etter 3 ukers aldring. Dette resultatet er veldig motstridende med hypotesen ettersom størst forekomst av ventilerte vanntrær fås i kabelen belastet med lav frekvens. Det skal her nevnes at de to kablene som sammenlignes er innfarget med ulik fargeblanding, som tilfører en usikkerhet til resultatet. Det at forekomsten av ventilerte vanntrær er såpass mye høyere i kablene belastet med dynamisk mekanisk belastning $f=0,1$ Hz er uansett svekkende for hypotesen.

Etter 4 ukers aldring er det funnet at forekomsten av ventilerte vanntrær er noe større i kabelen belastet dynamisk mekanisk med $f=1,0$ Hz sammenlignet med lavere frekvens, se Figur 4.10a. Forskjellen er så liten at det er umulig å si om dette er noe som skyldes en høyere frekvens.

Det kan antas at økt frekvens på den dynamisk mekaniske belastningen ikke får noen betydning for tettheten av bow-tie trær, da tettheten er omtrent lik ved 0,1 Hz og 1,0 Hz etter 3 ukers aldring, se Figur 4.10b. Hypotesen svekkes også ved at tettheten av bow-tie trær er størst i kabelen utsatt for dynamisk mekanisk belastning $f=0,1$ Hz etter 4 uker.

Når det gjelder den gjennomsnittlige lengden av ventilerte vanntrær og den gjennomsnittlige maksimale lengden av bow-tie trær viser resultatet i Figur 4.11 at både l_{av} og l_{max} er lavest ved dynamisk mekanisk belastning $f=1,0$ Hz etter 4 ukers aldring. Resultatet indikerer at hverken den gjennomsnittlige lengden av ventilerte trær eller den gjennomsnittlige maksimale lengden av bow-tie trær blir større med økende frekvens på belastningen.

Figur 4.12 viser at en høyere dynamisk mekanisk belastning heller ikke påvirker fordelingen av bow-tie trær i isolasjonen, ettersom tettheten av bow-tie trær er fordelt mer eller mindre likt i de ulike isolasjonssonene ved 0,1 og 1,0 Hz, med lavest tetthet i området nær den ytre halvlederen og størst tetthet i de to indre sonene i kabelenisolasjonens radielle retning.

Med bakgrunn i resultatene i delkapittel 4.3.2 er det grunnlag for å anta at en økt frekvens på den dynamiske belastningen ikke har betydning på vanntreveksten ved et mekanisk strekk på 1%. Resultatene støttes av tidligerer forsøk utført på den mekaniske testtriggen[16]. Det ble her gjort forsøk med samme forskjell i frekvens på den dynamisk mekaniske belastningen, men med et mekanisk strekk på 6%.

5.3 Lengste vanntre

Det er dokumentert at det finnes et ventilerte vanntre som er lenger en 11% av isolasjonstykkelsen ved 4 ukers aldring. Dette er kort tid sammenlignet med forventet levetid. Kabelens levetid kan reduseres av lange ventilerte trær, ettersom kabelens holdespenning reduseres[22].

5.3.1 Estimerte verdier av maksimal lengde av Bow-tie trær

De estimerte verdiene av den maksimale lengden til bow-tie trær, vist i Tabell 5 og 7, utgjør 3,4 - 4,8% av isolasjonstykkelsen i de ubelastede kablene og 3,3 - 4,8% i de mekanisk belastede kablene, med $\varphi = 0,95$. Veksten av bow-tie trær stagnerer etterhvert som tiden går og de fører derfor sjeldent til kabelhavari alene, se Figur 2.3. Ettersom de estimerte verdiene av den maksimale lengden til bow-tie trær utgjør en så liten del av den totale isolasjonstykkelsen kan en gå ut i fra at de ikke har redusert levetiden for kablene i forsøkene. Det kan også legges merke til at den mekaniske belastningen ikke gir noe høyere verdier for den estimerte maksimale lengden til bow-tie trær.

6 Konklusjon

Statisk og dynamisk mekanisk strekk på PEX-isolasjonen er dokumentert å akselerere veksten av ventilerte vanntrær ved den indre halvlederen i form av økt forekomst og lengde av vanntrær. Den mekaniske belastningen påvirker ikke forekomsten av ventilerte vanntrær fra den ytre halvlederen samt tettheten og lengden av bow-tie trær.

Innfryste strekkrefter som dannes nær lederen under produksjonsprosessen i PEX-kabler er dokumentert å gi en signifikant økning i forekomst av ventilerte vanntrær ved indre halvleder og tettheten av bow-tie trær. Det er funnet at strekkrefter på 5,6% kan frigjøres i PEX-isolasjonens aksial retning ved å nedkjøle PEX gradvis fra 120 °C til romtemperatur.

Det er også funnet at gjennomsnittlig lengde av ventilerte vanntrær fra den indre halvlederen er større i en PEX-kabel med lederen beholdt sammenlignet med en PEX-kabel uten leder. Den gjennomsnittlige maksimale lengden til bow-tie trær påvirkes ikke av de innfryste strekkreftene.

Det er dokumentert at tettheten av bow-tie trær er betydelig lavere i det ytre isolasjonsområdet sammenlignet med den midtre og indre isolasjonssonen for mekanisk ubelastede og mekanisk belastede kabler. Innfryste strekk- og kompresjonskrefter er vist å være den dominante effekten som akselerer veksten i det indre isolasjonsområdet og hindrer veksten i den ytre isolasjonssonen.

I en tripplelekstrudert PEX-kabel med lederen beholdt er det funnet at veksten av ventilerte vanntrær ved den indre halvlederen er i størrelsesorden med veksten i mekanisk belastede kabler. Det er dokumentert både like stor og større forekomst av ventilerte vanntrær fra den indre halvlederen i PEX-kabelen med leder sammenlignet med mekanisk belastede kabler. Lengden av ventilerte vanntrær fra den indre halvlederen er noe lavere i kabelen med leder sammenlignet med de mekanisk belastede kablene

Det er ingen signifikant forskjell i vanntreveksten i kabler som er aldret med statisk mekanisk belastning sammenlignet med dynamisk mekanisk belastning.

Fra eksperimenter på den mekaniske testtriggen er det grunnlag for å anta at vanntreveksten ikke øker med en økt frekvens på den dynamisk mekaniske belastningen. Forekomsten av vanntrær er i noen kabler dokumentert lavere ved 0,1 Hz dynamisk mekanisk belastning sammenlignet med kabler utsatt for en høyere frekvens $f= 1,0$ Hz. Resultatene viser at den gjennomsnittlige lengden av ventilerte vanntrær ved indre halvleder og den gjennomsnittlige maksimale lengden av bow-tie trær ikke øker med økende frekvens på den dynamisk mekaniske belastningen.

7 Forslag til videre arbeid

Det vil være av interesse å studere de innfryste kreftene i PEX-isolasjonen ytterligere. I denne rapporten er det dokumentert at innfryste strekkrefter som dannes under produksjonsprosessen øker vanntreveksten i isolasjonen. Videre arbeid kan bestå av å se nærmere på nettopp produksjonsprosessen. Eksperimentelt kan det for eksempel gjøres forsøk hvor en kabel med lederen beholdt utsettes for varmebehandling. Det vil gjøre forsøket mer realistisk å beholde lederen i isolasjonen. For at isolasjonen skal kunne bevege seg fritt når den ekspanderer ved oppvarming uten at lederen holder igjen, kan det tenkes at kabellengden bør være mindre enn 3 meter (benyttet i denne oppgaven). For en lang kabel vil det være fare for at kabelen ikke blir skikkelig avspent på grunn av lederen. Det bør også vurderes å bruke en lavere temperatur enn $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ i prosessen med varmebehandling, da PEX blir veldig myk ved denne temperaturen.

Det kan også gjøres flere forsøk hvor PEX-isolasjonens krymping loggføres ved nedkjøling. Ettersom nedkjølingsprosessen av kabelen er sentralt for dannelse av innfryste krefter vil det være interessant å gjøre forsøk med ulik hurtighet på nedkjølingen av isolasjonen, og sammenligne vanntrevekst i en hurtig nedkjølt kabel med vanntreveksten i en langsomt nedkjølt kabel.

Ved nye forsøk med den mekaniske testtriggen bør aldringstiden økes for å tydeliggjøre resultatene. Det kan også gjøres forsøk med andre vanntemperaturer enn romtemperaturen.

Bibliografi

- [1] Erling Ildstad
TET4195 High Voltage Equipment, Cable technology
NTNU, 2009
- [2] Forewind, *www.forewind.co.uk*[internett]
<http://www.forewind.co.uk/dogger-bank/overview.html>
- [3] Statoil, *www.statoil.com*[internett]
<http://www.statoil.com/en/TechnologyInnovation/NewEnergy/RenewablePowerProduction/Offshore/Hywind/Pages/HywindPuttingWindPowerToTheTest.aspx>
- [4] Teknisk ukeblad, *www.tu.no*[internett]
<http://www.tu.no/energi/2012/08/16/hywind-sliter-med-nettproblemer>
- [5] ABB, *www.abb.com*[Internett]
<http://www.abb.com/cawp/seitp202/b6dcda123bb5d28bc125778500352b28.aspx>
- [6] E.F. Steennis og F.H. Kreuger
Water Treeing in Polyethylene Cables
N. V. KEMA, Arnhem and Technical University Delft, The Netherlands,
1990
- [7] Hallvard Faremo, *Power Cables - Service Experience*[Forelesning]
NTNU, 2012
- [8] Erling Ildstad
High Voltage Insulation Materials
NTNU, August 2011
- [9] Jarle Sletbak
The mechanical damage theory of water treeing. -A status report
NTNU, 1991
- [10] E. Ildstad, H. Bårdsen, H. Faremo and B. Knutsen
Influence of Mechanical Stress and Frequency on Water Treeing in XLPE Cable Insulation
NTNU, 1990
- [11] Erling Ildstad
Condition Assessment of Power Apparatus
NTNU, 1998

- [12] Erling Ildstad, Ståle Nordås og Truls A. Lindseth
Water Treeing of XLPE Cables under combined mechanical and electrical stress
NTNU
- [13] Ståle Nordås og Erling Ildstad
The Influence of Strain on Water Treeing in XLPE Power Cables
NTNU, 2010
- [14] Erling Ildstad og Hallvard Faremo
Effect of Dynamic Mechanical Load on Water Treeing of XLPE Cables
NTNU, 2012
- [15] Frank Mauseth, Martin Amundsen og Hallvard Faremo
Water Tree Growth of Wet XLPE Cables Stressed with DC and High Frequency AC Voltage Superimposed
NTNU
- [16] Truls Amundsen Lindseth
Vanntrevekst i mekanisk og elektrisk påkjente PEX-kabler
NTNU, Juli 2011
- [17] 3D-visualisering ved B. Aarseth
- [18] Stian Karlsen med fler
Dynamic deep water power cables
Nexans norway AS, 2009
- [19] Simon Årdal Aarseth
Vanntrevekst i statisk og dynamisk mekanisk belastet PEX-kabel
NTNU, Høst 2012
- [20] Erling Ildstad og Simon Årdal Aarseth
Enhancement of Water Tree initiation due to residual and applied Mechanical Strain on XLPE Cables
NTNU, 2013
- [21] Suzuki, Kanaoka og Sekit
Measurments on The Frozen Strain in XLPE Insulated Cables using Thermomechanical Analysis
Cable research Laboratory, Hitachi cable, Japan, 1988
- [22] Sverre Hvidsten, Erling Ildstad m.fler
Correlation Between AC Breakdown Strength and Low Frequency Dielectric Loss of Water Tree Aged XLPE Cables
NTNU, 1998
- [23] E. Ildstad, J.Sletbak and A.Bruaset
Estimating the Maximum Length of Water Trees Using Extreme Value Statistics
NTNU, 1991

Tillegg A

Verdier fra mikroskopanalysen

Tabell A.1: Analysert isolasjonslengde for ventilerte vanntrær og bow-tie trær

Kabelobjekt	Spenning [kV]	Aldringstid [uker]	Analysert isolasjonslengde for ventilerte trær[mm]	Analysert isolasjonslengde for bow-tie trær[mm]	
				Forekomst	$I_{av,max}$
Referanse $\epsilon=0\%$, $f=0$ Hz	14	3	40	40	40
Referanse med leder	14	3	40	20	60
Kabel med leder	25	3	40	0	40
Statisk $\epsilon=1\%$, $f=0$ Hz	14	3	40	40	40
Dynamisk $\epsilon=1\%$, $f=0.1$ Hz	14	3	40	40	40
Dynamisk $\epsilon=1\%$, $f=1.0$ Hz	14	3	70	40	70
Dynamisk $\epsilon=1\%$, $f=0.1$ Hz	14	4	70	40	70
Dynamisk $\epsilon=1\%$, $f=1.0$ Hz	14	4	70	40	70
Varmebehandlet kabel	14	3	40	40	40

Tabell A.2: Forekomst og gjennomsnittlig lengde av ventilerte vanntrær i ubelastede kabler

Type kabel	Aldringstid [uker]	Forekomst og gjennomsnittlig lengde av ventilerte vanntrær			
		Ventilerte trær ved indre halvleder		Ventilerte trær ved ytre halvleder	
		n [cm ⁻²]	l _{av} [μm]	n [cm ⁻²]	l _{av} [μm]
ε= 0 %, f= 0 Hz Referanse	3	0,35	98,4	0,11	168
Referanse med leder	3	1,89	120,9	0,11	88
25 kV kabel med leder	3	5,02	94	0,3	109,3
varmebehandlet kabel	3	0,07	280	0	0

Tabell A.3: Forekomst og gjennomsnittlig lengde av ventilerte vanntrær i mekanisk belastede kabler

Type kabel	Aldringstid [uker]	Forekomst og gjennomsnittlig lengde av ventilerte vanntrær			
		Ventilerte trær ved indre halvleder		Ventilerte trær ved ytre halvleder	
		n [cm ⁻²]	l _{av} [μm]	n [cm ⁻²]	l _{av} [μm]
ε= 0 %, f= 0 Hz Referanse	3	0,35	98,4	0,11	168
ε= 1 %, f= 0 Hz Statisk	3	1,12	140,8	0,08	80
ε= 1 %, f= 0.1 Hz Dynamisk	3	1,89	135,2	0,08	208
ε= 1 %, f= 1.0 Hz Dynamisk	3	1,08	146,4	0	0
ε= 1 %, f= 0.1 Hz Dynamisk	4	1,24	180,8	0,15	273
ε= 1 %, f= 1.0 Hz Dynamisk	4	1,52	157,6	0	0

Tabell A.4: Forekomst og gjennomsnittlig maksimal lengde av bow-tie trær i ubelastede kabler

Type kabel	Aldringstid [uker]	Forekomst og gjennomsnittlig maksimal lengde av bow-tie trær					$l_{av,max}$ [μm]
		n [cm^{-1}]				totalt	
		Indre halvleder	Midt	Ytre halvleder	totalt		
$\epsilon=0\%$, $f=0$ Hz Referanse	3	61,8	53,8	29,8	145,3	84,3	
Referanse med leder	3	64,0	74,5	26,0	164,5	80,4	
25 kV kabel med leder	3	-	-	-	-	67,2	
varmebehandlet kabel	3	27,3	67,8	19,8	114,8	84,0	

Tabell A.5: Forekomst og gjennomsnittlig maksimal lengde av bow-tie trær i mekanisk belastede kabler

Type kabel	Aldringstid [uker]	Forekomst og gjennomsnittlig maksimal lengde av bow-tie trær					$l_{av,max}$ [μm]
		n [cm^{-1}]				totalt	
		Indre halvleder	Midt	Ytre halvleder	totalt		
$\epsilon=0\%$, $f=0$ Hz Referanse	3	61,8	53,8	29,8	145,3	84,3	
$\epsilon=1\%$, $f=0$ Hz Statisk	3	40,5	53,5	25,0	119,0	78,4	
$\epsilon=1\%$, $f=0.1$ Hz Dynamisk	3	44	41	19,5	104,5	70,4	
$\epsilon=1\%$, $f=1.0$ Hz Dynamisk	3	40,8	50,5	15,3	106,5	84,0	
$\epsilon=1\%$, $f=0.1$ Hz Dynamisk	4	37,0	43,8	16,8	97,5	84,8	
$\epsilon=1\%$, $f=1.0$ Hz Dynamisk	4	32,0	32,3	12,3	76,5	79,2	

Tabell A.6: PEX-isolasjonens krymping ved nedkjøling fra 120 °C

PEX-isolasjonens krymping ved nedkjøling fra 120°C til romtemperatur		
Temperatur [°C]	Startlengde 0.494 m	Startlengde 0.994 m
120	-	-
81,2	0.485 m	0.976 m
67,2	0.480 m	0.968 m
21,2	0.470 m	0.945 m
Fjernet strekk	4,9 %	4,9 %

Tillegg B

Elektrisk feltfordeling i kabler

I en koaksialkabel er den elektriske feltstyrken gitt som funksjon av radien ved følgende formel:

$$E(r) = \frac{U}{r \ln \frac{r_y}{r_i}} \quad (\text{B.1})$$

hvor U er påtrykt spenning, r er radien i et gitt punkt, r_i er radien ved lederens overflate og r_y er radien ved den ytre overflaten. I kabelen benyttet i forsøkene er $r_i = 5.7\text{mm}$ og $r_y = 10.4\text{mm}$.

Ved påtrykt spenning på 13.85 kV er den maksimale elektriske feltstyrken i kabelen ved den indre halvlederen når $r = r_i$

$$E_{max} \approx 4[\text{kV/mm}]$$

og den minimale elektriske feltstyrken er ved den ytre overflaten der $r = r_y$

$$E_{min} \approx 2.2[\text{kV/mm}]$$

Følgende formel benyttes for å regne ut den gjennomsnittlige elektriske feltstyrken i kabelen:

$$E_{gjennomsnitt} = \frac{U}{r_y - r_i} = \frac{13.85\text{kV}}{10.4\text{mm} - 5.7\text{mm}} \approx 2.95[\text{kV/mm}] \quad (\text{B.2})$$

Det er ønskelig å ha et elektrisk felt ved den ytre halvlederen som er like stort som ved den indre halvlederen på ett kabelobjekt. For å få $E_{min} \approx 4[\text{kV/mm}]$ må påtrykt spenning på dette kabelobjektet være:

$$U = E(r)r \ln \frac{r_y}{r_i} \approx 25[\text{kV}] \quad (\text{B.3})$$

Det må altså påtrykkes en spenning på 25 kV på kabelobjektet for å oppnå et elektrisk felt på 4[kV/mm] ved ytre halvleder.

Tillegg C

Ekstremalverdistatistikk

I metoden med ekstremalverdistatistikk brukes kun lengden av det lengste vann-treet i hver prøve, typisk ett snitt, men med få vanntrær kan en slå sammen flere snitt. I hver prøve vil lengden til det største treet variere. Verdiene blir behandlet som stokastiske variabler, og brukes ved hjelp av ekstremalverdistatistikk til å estimere den mest sannsynlige lengden av det lengste vann-treet 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 til at antall prøver må være høyt nok, da med $N \geq 5$. I tillegg til disse kravene må det antas at distribusjonen, $G(x)$, av vanntrær er lik gjennom hele kabelen og at hver observasjon av det lengste treet er uavhengig av hverandre. Sannsynligheten $F(x)$ kan da bestemmes empirisk fra målingene. $F(x)$ er avhengig av $G(x)$ og n , men det er teoretisk bevist at dersom n øker vil $F(x)$ tilnærme seg en asymptotisk funksjon[23]:

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

Parameteren u er 36,8% verdien til fordelingen mens α er stigningstallet til fordelingen og er et mål på spredningen. Variabelen, x , i fordelingen ligger mellom $-\infty$ og ∞ . Når maksimal lengden av vanntrær er variabelen er det fysisk umulig for x å ha verdier lavere enn null, men verdien for x vil ligge mellom 0 og tykkelsen til isolasjonsveggen, $t_{isolasjon}$. Dersom den maksimale lengden som er observert er nærme eller lik tykkelsen til isolasjonsveggen vil ligning C.1 gi avvik.

Et alternativ til ligning C.1 er å bruke en logaritmisk transformasjon av variabelen x slik at det kan settes en øvre grense for x -verdien. Ligningen får da følgende form:

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

Hvor v er 37% verdien til fordelingen og β er stigningstallet og et mål på spredningen. w er øvre grense for variabelen x , og er i dette tilfellet lik $t_{isolasjon}$.

Ligning C.2 kan kalles Weibullfordelingen av den største verdien grunnet sin analogi med Weibullfordelingen av den minste verdien. Fordelen med denne fordelingen er at det introduseres en maksimal verdi w for variabelen.

1 Ekstrapolering

Den mest sannsynlige verdien av l_{max} kan anslås i en kabellengde, L , ved bruk av den asymptotiske fordelingen. For kabellengden L er sannsynligheten for at den maksimale vanntrelengden overstiger verdien av x :

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

Dersom Weibullfordelingen i ligning C.2 benyttes:

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

L_0 er lengden av analysert kabelisolasjon. L_0 må inneholde misnt fem prøver som igjen inneholder mer enn ti trær.

2 Beregning av parametere

Dette kapitlet viser fremgangsmåten for beregning av parametere trinn for trinn, ettersom dette ikke kommer frem fra ligningene intuitivt. I formel C.5 er n det totale antall prøver og n_0 er antall prøver som har maksimal lengde mindre enn x -verdien sannsynligheten beregnes for.

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

I ligningen over er det ønskelig at n er så høy som mulig, slik at påliteligheten til resultatene øker. I Tabell C.1 er $n=16$ og i hver prøve er 0,25 cm isolasjon analysert. L_0 er 4 cm.

Tabell C.1: Venstre tabell viser det lengste bow-tie treet i hver prøve. Høyre tabell viser beregning av sannsynlighet ved hjelp av formel C.5

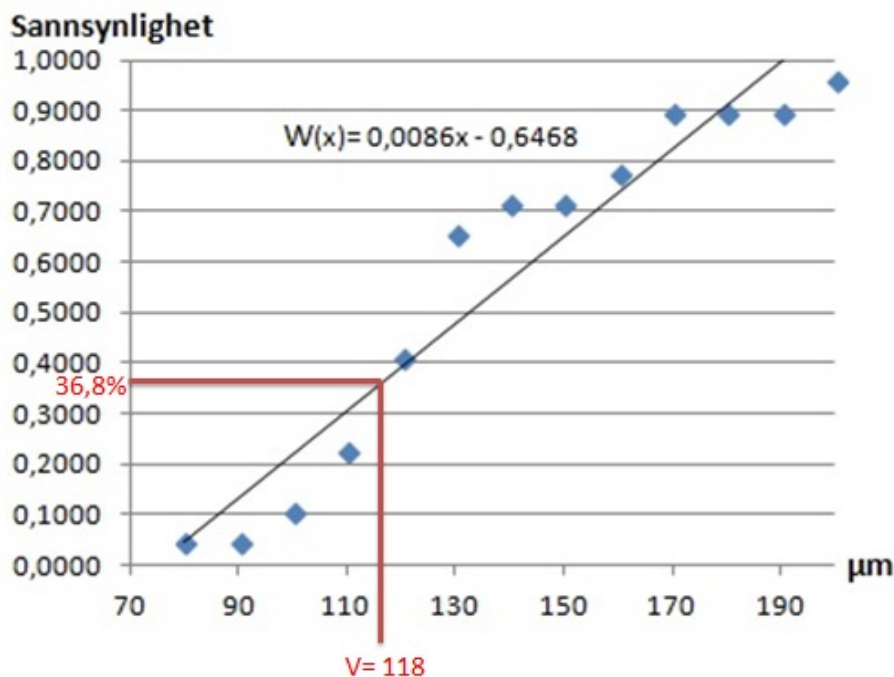
Prøve nr	Maksimal lengde [streker]	Maksimal lengde [μm]	x-verdi [μm]	n_0	P
1	14	112,0	80	1	0,0427
2	14	112,0	90	1	0,0427
3	16	128,0	100	2	0,1037
4	13	104,0	110	4	0,2256
5	19	152,0	120	7	0,4085
6	21	168,0	130	11	0,6524
7	12	96,0	140	12	0,7134
8	14	112,0	150	12	0,7134
9	15	120,0	160	13	0,7744
10	16	128,0	170	15	0,8963
11	24	192,0	180	15	0,8963
12	9	72,0	190	15	0,8963
13	20	160,0	200	16	0,9573
14	17	136,0			
15	13	104,0			
16	15	120,0			

Etter at det lengste treet i hver prøve er notert ned, se Tabell C.1, blir det laget en kolonne som angir verdiene x-aksen i fordelingen skal ha, kalt "x-verdi". Verdiene tilpasses lengden av trærne funnet i prøvene.

Etter dette kan kolonnen med n_0 fylles ut. Den maksimale lengden i mikrometer sammenlignes med x-verdien. n_0 er verdien til antallet prøver hvor $l_{max} < x$. Fra Tabell C.1 kan en se at opp til 100 mikrometer er det kun prøve 7 og 12 hvor $l_{max} < x$, dermed er $n_0 = 2$. Når $x = 130$ ser en at det er hele 11 prøver som har en maksimal lengde lavere enn x-verdien.

Sannsynligheten P regnes ut ved ligning C.5.

Verdiene for x og P kan deretter plottes i EXCEL og det trekkes en trendlinje mellom punktene, se Figur 2.1



Figur 2.1: Grafisk fremstilling av verdiene i Tabell C.1 plottet i EXCEL. Y-aksen angir sannsynligheten fra 0 til 1, og x-aksen angir lengden av vanntre i mikrometer

I Figur 2.1 kan verdien til v finnes ved å trekke en linje fra 36,8% og bort til den treffer trendlinjen. Verdien til v kan da leses av på x-aksen. Den røde linjen i Figur 2.1 viser hvordan v finnes. Nå er det bare tre ukjente variable i ligning C.2; $W(x)$, x og β . Det velges en tilfeldig verdi for x langs x-aksen til plottet. Verdien til $W(x)$ finnes da ved å sette inn den valgte x -verdien i funksjonen til trendlinjen, vist i Figur 2.1.

Den siste ukjente verdien, β , fås ved å løse C.2 med hensyn på β :

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

Når β er regnet ut vil kun x være en variabel i ligning C.2. Verdiene til φ velges til 0,95, 0,5 og 0,05 for utregning av x -verdiene. Før x -verdiene kan regnes ut må $W(x)$ regnes ut. Dette gjøres ved å løse ligning C.4 med hensyn på $W(x)$:

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

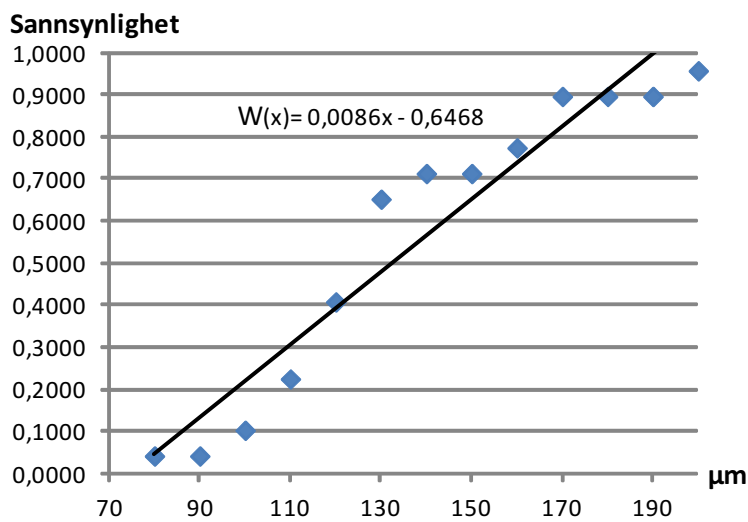
$W(x)$ løses med hensyn på x :

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

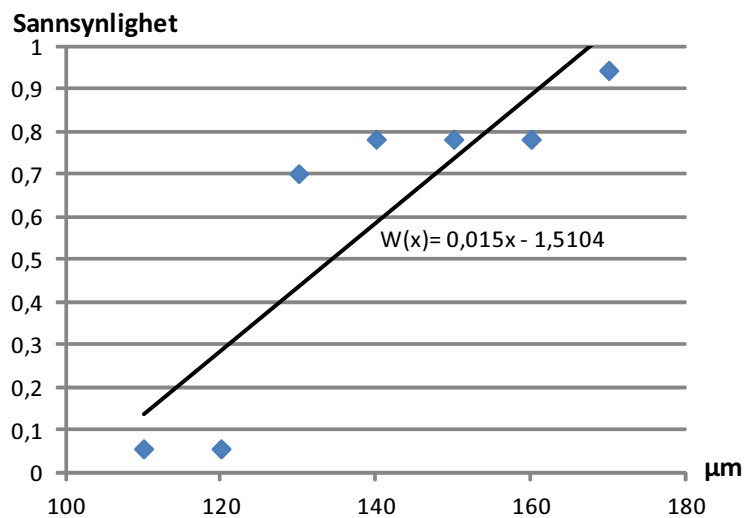
Tillegg D

Plott av sannsynlighetsfordeling

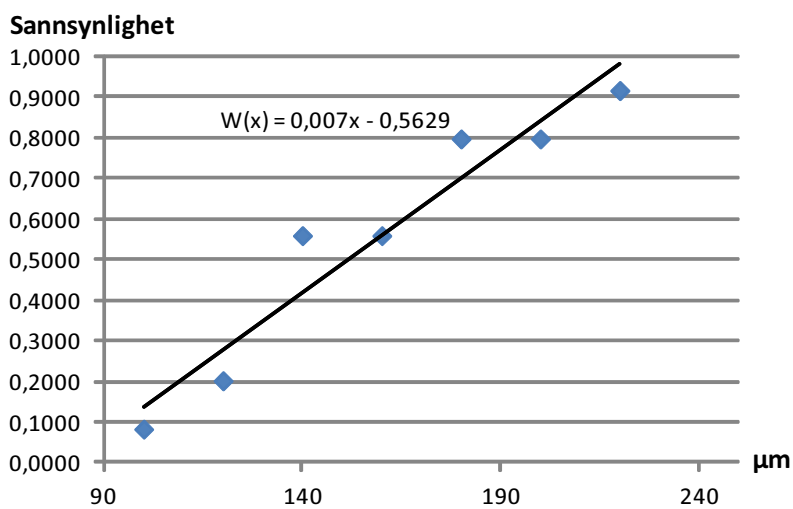
1 Ubelastede kabler



Figur 1.1: Kumulativ sannsynlighetsfordeling av maksimal lengde av bow-tie trær for referansekabel uten leder aldret i 3 uker. $n=16$, hvor lengden per prøve er 0,25 cm. $L_0=0,04$ m, $v=118$, $x=150$, $W(x)=0,64$, $\beta=116,7$

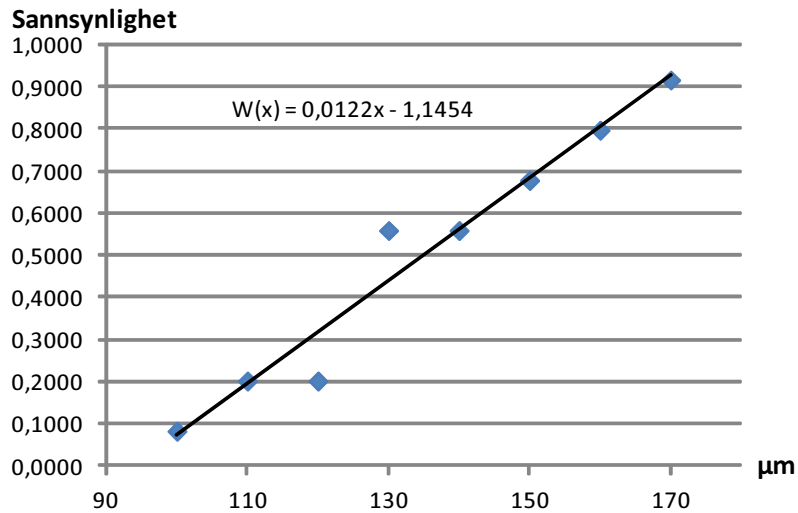


Figur 1.2: Kumulativ sannsynlighetsfordeling av maksimal lengde av bow-tie trær for referansekabel med leder aldret i 3 uker. $n=12$, hvor lengden per prøve er 0,5 cm. $L_0=0,06$ m, $v=125,2$, $x=150$, $W(x)=0,74$, $\beta=220,7$

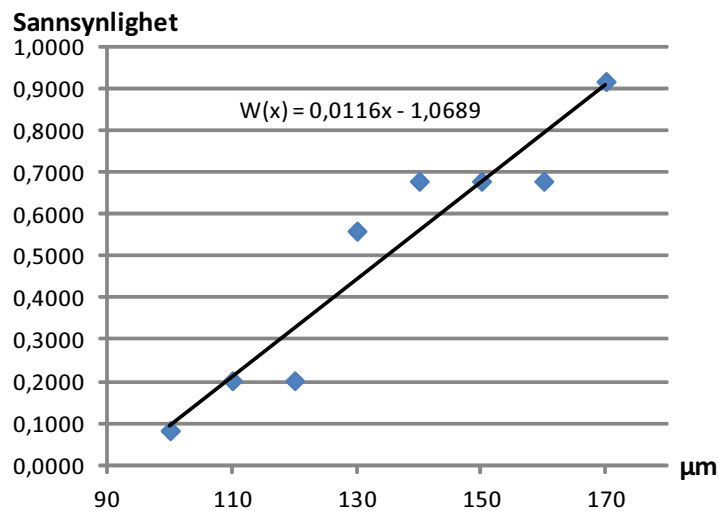


Figur 1.3: Kumulativ sannsynlighetsfordeling av maksimal lengde av bow-tie trær for varmebehandlet kabel uten leder aldret i 3 uker. $n=8$, hvor lengden per prøve er 0,5 cm. $L_0=0,04$ m, $v=133$, $x=190$, $W(x)=0,78$, $\beta=105,7$

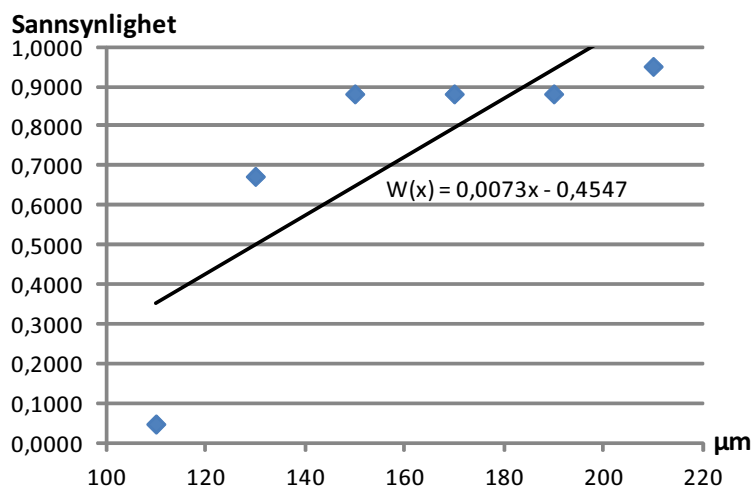
2 Mekanisk belastede kabler



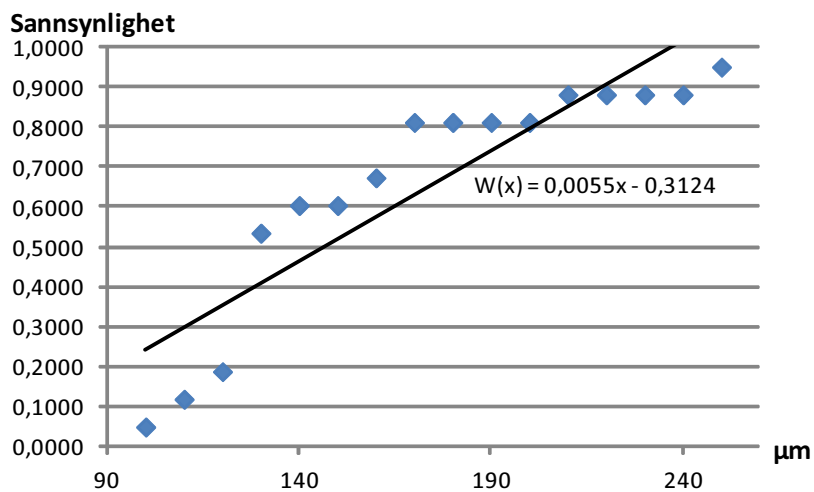
Figur 2.1: Kumulativ sannsynlighetsfordeling av maksimal lengde av bow-tie trær for statisk mekanisk belastet kabel aldret i 3 uker. $n=8$, hvor lengden per prøve er 0,5 cm. $L_0=0,04$ m, $v=124$, $x=160$, $W(x)=0,46$, $\beta=194,9$



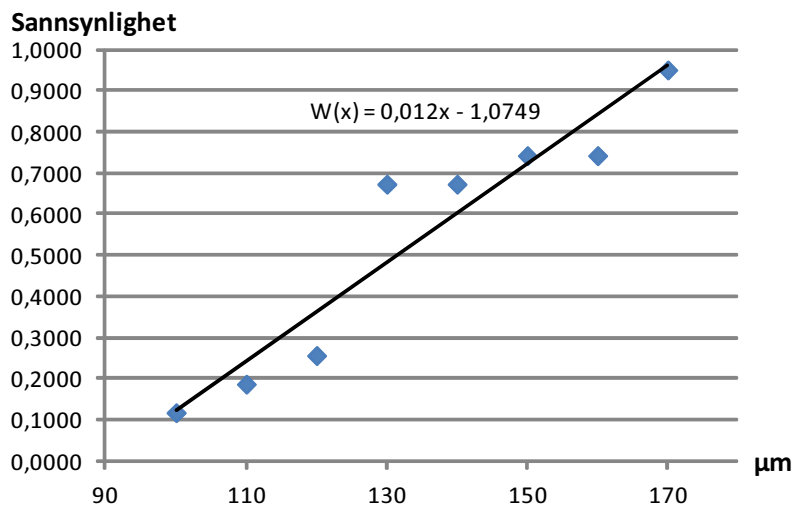
Figur 2.2: Kumulativ sannsynlighetsfordeling av maksimal lengde av bow-tie trær for dynamisk $f=0,1$ Hz mekanisk belastet kabel aldret i 3 uker. $n=8$, hvor lengden per prøve er 0,5 cm. $L_0=0,04$ m, $v=123,9$, $x=170$, $W(x)=0,9$, $\beta=225,4$



Figur 2.3: Kumulativ sannsynlighetsfordeling av maksimal lengde av bow-tie trær for dynamisk $f= 1,0$ Hz mekanisk belastet kabel aldret i 3 uker. $n= 14$, hvor lengden per prøve er 0,5 cm. $L_0= 0,07$ m, $v= 113,8$, $x= 160$, $W(x)= 0,71$, $\beta= 107,2$



Figur 2.4: Kumulativ sannsynlighetsfordeling av maksimal lengde av bow-tie trær for dynamisk $f= 0,1$ Hz mekanisk belastet kabel aldret i 4 uker. $n= 14$, hvor lengden per prøve er 0,5 cm. $L_0= 0,07$ m, $v= 123,7$, $x= 140$, $W(x)= 0,71$, $\beta= 69$

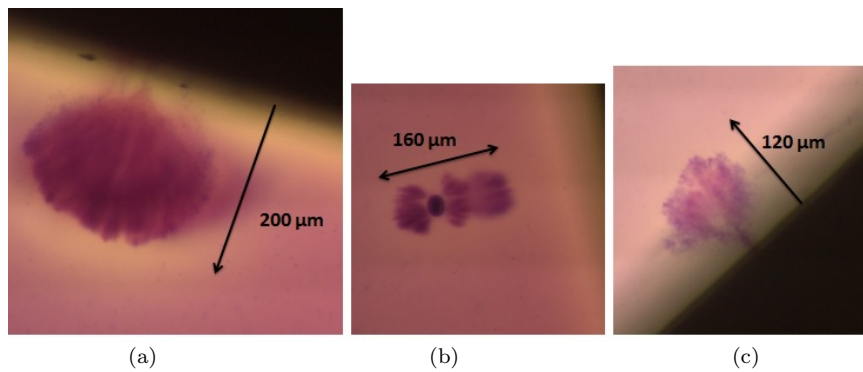


Figur 2.5: Kumulativ sannsynlighetsfordeling av maksimal lengde av bow-tie trær for dynamisk $f= 1,0$ Hz mekanisk belastet kabel aldret i 4 uker. $n= 14$, hvor lengden per prøve er 0,5 cm. $L_0= 0,07$ m, $v= 120,2$, $x= 160$, $W(x)= 0,85$, $\beta= 204,4$

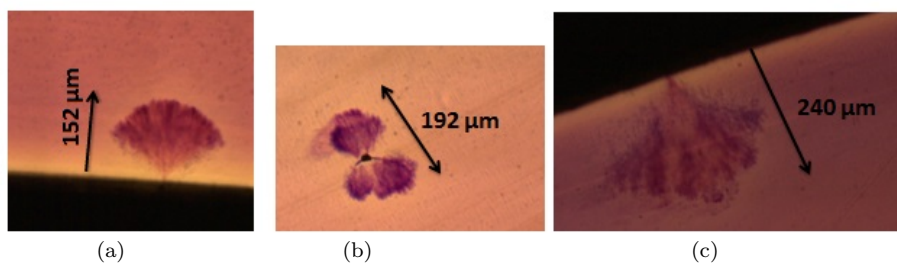
Tillegg E

Bilder av de lengste vanntrærne i hvert kabelobjekt

1 Referansekablene

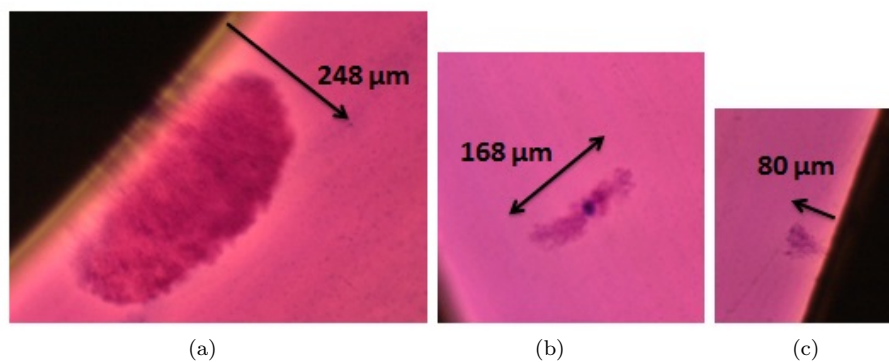


Figur 1.1: Ventilert vanntre ved indre halvleder (a), bow-tie tre (b) og ventilert vanntre ved ytre halvleder (c) i referansekabel med leder

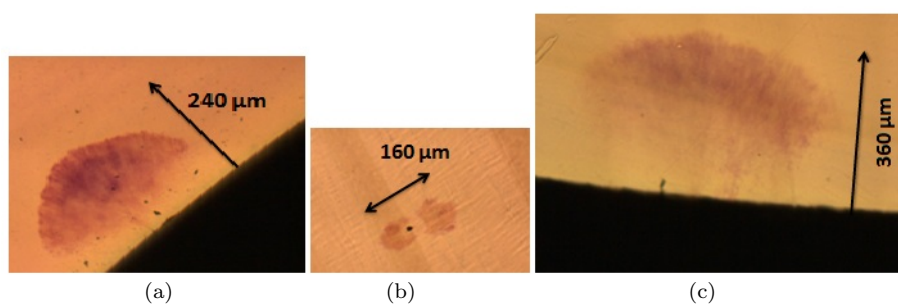


Figur 1.2: Ventilert vannre ved indre halvleder (a), bow-tie tre (b) og ventilert vannre ved ytre halvleder (c) i referansekabel uten leder

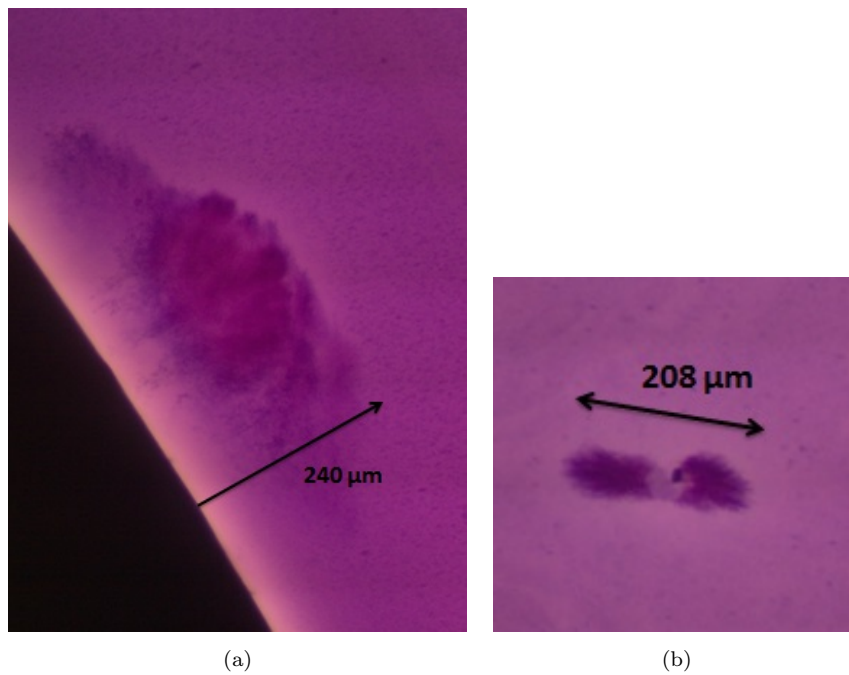
2 Mekanisk belastede kabler



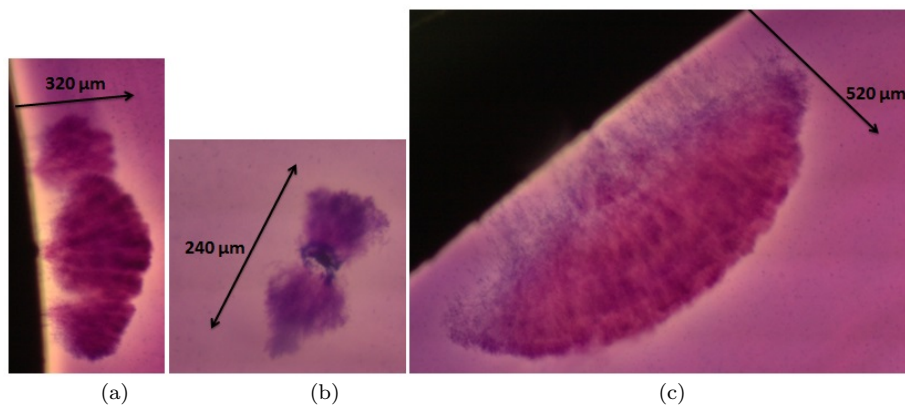
Figur 2.1: Ventilert vannre ved indre halvleder (a), bow-tie tre (b) og ventilert vannre ved ytre halvleder (c) i statisk mekanisk belastet kabel



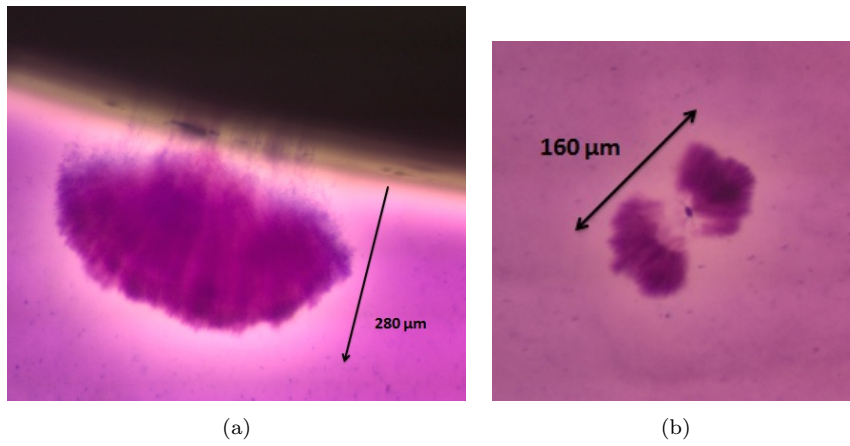
Figur 2.2: Ventilert vannre fra indre halvleder (a), bow-tie tre (b) og ventilert vannre fra ytre halvleder (c) i 0,1 Hz dynamisk mekanisk belastet kabel



Figur 2.3: Ventilert vanntre fra indre halvleder (a) og bow-tie tre (b) i 1.0 Hz dynamisk mekanisk belastet kabel



Figur 2.4: Ventilert vanntre fra indre halvleder (a), bow-tie tre (b) og ventilert vanntre fra ytre halvleder (c) i 0,1 Hz dynamisk mekanisk belastet kabel aldret i 4 uker



Figur 2.5: Ventilert vantage fra indre halvleder (a) og bow-tie tre (b) i 1.0 Hz dynamisk mekanisk belastet kabel aldret i 4 uker