

# Virkning av temperaturer og mekaniske spenninger på vanntrevekst i PEX-isolerte høyspentkabler

**Kurt-Albert Grov Plassen**

Master i energi og miljø

Innlevert: januar 2015

Hovedveileder: Erling Ildstad, ELKRAFT

Medveileder: Hallvard Faremo, SINTEF

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet  
Institutt for elkraftteknikk



# Virkning av temperaturer og mekaniske spenninger på vanttrevest i PEX-isolerte høyspentkabler

**Kurt-Albert Grov Plassen**

Masteroppgave i Energi og Miljø

Innleveringsdato: 23. januar 2015

Hovedveileder: Erling Ildstad, ELKRAFT

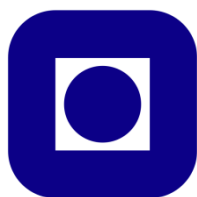
Medveileder: Hallvard Faremo, SINTEF

Norges teknisk- naturvitenskapelige universitet

Institutt for elkraftteknikk



# NORGES TEKNISK-NATURVITENSKAPELIG UNIVERSITET



## Masteroppgave året 2014/2015

Kandidatens navn: Kurt-Albert Grov Plassen [kurtalbe@stud.ntnu.no](mailto:kurtalbe@stud.ntnu.no)  
Veileder: Professor Erling Ildstad [Erling.Ildstad@elkraft.ntnu.no](mailto:Erling.Ildstad@elkraft.ntnu.no)  
Medveileder: Seniorforsker Hallvard Faremo [hallvard.faremo@sintef.no](mailto:hallvard.faremo@sintef.no)

Fag: TET4900 - Elektrisk energiteknikk, masteroppgave, Energi og Miljø, Elkraftteknikk

Oppgavens tittel (norsk): Virkning av temperaturer og mekaniske spenninger på vanntrevekst i PEX-isolerte høyspentkabler.

Title of the project (english): Effect of temperatures and mechanical stress on water treeing in XLPE power cables.

Dersom PEX-isolasjonen i en høyspentkabel eksponeres for fuktighet vil det i isolasjonen dannes vanntreer. Denne nedbrytningsmekanismen reduserer kabelens elektriske holdfasthet og levetid. Tidligere arbeider har vist at trelengde og antall vanntreer øker med statiske og dynamiske mekaniske spenninger. Dette er av stor betydning for valg av teknologi for nettilkobling av offshore kraftprodusenter og kraftkonsumere.

I denne oppgaven skal det undersøkes hvordan temperaturer sammen med statiske krefter virker inn på vanntreveksten i en PEX-isolert kabel.

Det utføres laboratorieeksperimenter på spenningsatte kabler forlagt i vann ved tre forskjellige temperaturer. Prøveobjekter utsettes for ulike statiske krefter før de snittes opp og analyseres i mikroskop. Med dette vil det skaffes innsikt i hvordan temperaturforskjeller og ulike statiske krefter virker inn på vanntrevekst i PEX-isolerte høyspentkabler.

Oppgavens elementer:

1. Basert på en litteraturstudie skal det gjøres rede for hvordan temperatur og ulike statiske krefter virker inn på vanntrevekst i PEX-isolasjonen.
2. Det skal utvikles egnet metodikk for og gjennomføres vanntrealdring av 12 kV PEX-isolerte kabelobjekter ved forskjellige temperaturer.
3. Etter aldring skal det gjennomføres en mikroskopanalyse av kabelisolasjonen med hensyn på maksimal lengde og posisjonering av vanntreer.
4. Resultatene skal diskuteres og vurderes opp mot tidligere funn, og en konklusjon skal settes.

Oppgaven ble gitt: 25. august 2014

Besvarelsen leveres innen: 23. januar 2015



## Forord

Denne oppgaven er en fortsettelse av en prosjektoppgave som ble utført våren 2014 og er en besvarelse på en masteroppgave ved Norges Teknisk- Naturvitenskapelige Universitet i Trondheim, i sivilingeniørstudiet Energi og Miljø med fordypning i Elektrisk Energiteknikk. Oppgavens tittel er: Virkningen av temperaturer og mekaniske spenninger på vanntrekest i PEX-isolerte høyspentkabler.

Formålet med denne oppgaven er å gi bedre forståelse av de ulike faktorenes innvirkning på vanntrekest i PEX-isolerte kabler, og på denne måten gi videre anbefalinger for hvordan slike vanntreker på best mulig måte kan unngås. Dette er av stor interesse da vanntreker i stor grad bidrar til å redusere en kabels holdfasthet og levetid. Vanntreker vil i denne oppgaven bli fremprovosert under ulike termiske og mekaniske forhold, for å skape et godt grunnlag for snittanalyse med sammenligninger og diskusjoner.

Oppgaven har gitt dypere forståelse av kabelproduksjon, kabelisolasjon og vanntrekest, og gitt innsikt i det praktiske arbeidet som blir praktisert ved forskning. Oppgaven er av en praktisk type, og mye tid ble benyttet til fremstilling av prøveobjekt og analyse av kabelsnitt.

Jeg ønsker å takke professor Erling Ildstad og seniorforsker Hallvard Faremo for god veiledning og hjelp med både teoretisk og praktisk arbeid underveis i oppgaven.

En stor takk rettes til de ansatte ved institutt for elkraftteknikk ved NTNU for opplæring i bruk, kalibrering og montering av tekniske installasjoner.

Det rettes også en stor takk til de ansatte ved det tekniske verkstedet ved elkraftteknikk for god hjelp med fremstilling av prøveobjektene.

Jeg ønsker også å takke sivilingeniør Jorunn Hølto, ved SINTEF energi AS, for god opplæring i bruken av mikroskopene.

Jeg vil rette en stor takk til mine venner og min familie, uten deres hjelp og støtte ville jeg ikke vært der jeg er i dag.

Til slutt vil jeg rette en stor takk til mine nære venner på G220, for de mange eventyrene vi har opplevd sammen og historiene vi har delt, og for at dere har gjort at jeg har gledet meg til hver eneste arbeidsdag.

Trondheim, 23. januar 2015

Kurt-Albert Grov Plassen





## Sammendrag

Vanntær er en nedbrytningsmekanisme som oppstår i polymerisolerte kabler forlagt i vann som utsettes for et alternerende elektrisk felt. Denne nedbrytningsmekanismen reduserer kabelens elektriske holdfasthet og levetid, og er en av de mest kritiske aldringsmekanismene for PEX-isolerte kabler. I dagens samfunn flyttes store kraftprodusenter og kraftkonsumere offshore, noe som gir et stort behov for gode og sikre kraftoverføringer. På grunn av dette er det av interesse å se på de ulike faktorene som er med å påvirke de ulike nedbrytningsmekanismene.

I denne oppgaven ble effekten av både temperaturer og mekaniske spenninger undersøkt ved å fremprovosere store mengder vanntær i 10 prøveobjekter. Prøveobjektene bestod av trippelstruderte 12 kV PEX-kabler, som ble påtrykt en 50 Hz spenning på 13 kV, samtidig som de kontinuerlig ble tilført fuktighet. For å undersøke temperatureffekten, ble de ti prøveobjektene fordelt på fire gjennomkjøringer ved tre forskjellige temperaturer. Tre ble utsatt for 18 °C, tre for 40 °C og fire for 60 °C.

Før hver gjennomkjøring ble lederen fjernet i to av prøveobjektene. Blant disse to objektene ble ett strekt 2 %. Dette ble gjort for å gi de ulike prøveobjektene forskjellige mekaniske spenninger. Dermed ble hver mekanisk spenning også utsatt for alle temperaturene.

Etter at hver gjennomkjøring hadde stått spenningsatt i tre uker, ble det fra hvert prøveobjekt laget ti kabelsnitt. Disse snittene ble så farget med metylblått før de ble analysert med mikroskop. I denne analysen var det av interesse å telle hvor mange vanntær over 30 µm som ble initiert i hvert snitt, og hvor langt det lengste vanntreet var. Deretter ble gjennomsnittlig antall vanntær og gjennomsnittlig maksimal trelengde i hvert prøveobjekt sammenlignet.

Det viste seg at etter en aldringsperiode på tre uker, hadde kun tre ventilerte vanntær initiert. Dette viser at det kreves en lengre aldringsperiode for å få nok resultater til å trekke noen konklusjon angående vekst av ventilerte vanntær.

Resultatene antyder at antallet vanntær i en PEX-isolert høyspentkabel er sterkt avhengig av de mekaniske spenningene ved lavere temperaturer. Dersom temperaturen øker, minker også effekten av de mekaniske spenningene. Dette var spesielt synlig i prøveobjektene som ble strukket 2 %. Dette kommer av at isolasjonen blir mer viskøs slik at de innefryste kreftene som finnes i isolasjonen relaxeres. Resultatene indikerer også at tettheten av vanntær øker ved økende temperatur, men at lengden til trærne da også blir kortere. Dette kan forklares av en kombinasjon av mer viskøs isolasjon og økning i diffusjon av vann ved økende temperaturer.

Det viste seg også at lengden av gjennomsnittlig lengste vanntre i liten grad ble påvirket av temperatur og mekanisk spenning, og var mer avhengig av andelen forurensning til stede i kabelisolasjonen.



## Abstract

Water treeing is an aging mechanism that occurs in all polymer insulated cables exposed to an alternating electric field and water at the same time. This aging mechanism is considered one of the most critical since it reduces both the dielectric strength and lifetime of a cable. Due to the development in offshore industry, there is an increase in the need for more stable transmission cables. Thus the research on water treeing is of increasing interest.

In this project both the effect of temperature and mechanical stress on water treeing will be examined. All together ten 12 kV XLPE insulated test cables, will experience three different temperatures and three different mechanical stresses. An alternating voltage of 13 kV with a frequency of 50 Hz will be applied to all cables during a test period of three weeks. At the same time they will be exposed to water.

The first three cables were exposed to water at a temperature of 18 °C, the next three 40°C, then three more at 60 °C before a final cable was exposed to water at a temperature at 60 °C. When heated, the cables were also exposed to different mechanical stress.

At each temperature level the conductor had been removed from two of the three cables. One of the two cables was also extended by 2 %. This way all three cables experienced different mechanical stress.

After the test period of three weeks had passed, the cables were removed from the test setup, sliced up and colored. The slices were then analyzed by counting the number of water trees bigger than 30  $\mu\text{m}$  found in the insulation, as well as measuring the length of the longest water tree. After all the slices were analyzed, the mean values were calculated and compared.

The results show that the amount of water trees in XLPE-cables is strongly dependant on the mechanical stress at low temperatures. This is evident by the high number of water trees in the extended cable. At higher temperatures, the significance of mechanical stress decreases. This is thought to be because of the increase of insulation viscosity at increasing temperatures. In this case, the inherent tensions in the insulation are released. The results also show an increase in water tree density at higher temperatures due to a combination of higher insulation viscosity and higher water diffusion into the insulation.

When considering water tree length, the results show that the length is highly independent from both temperature and mechanical stress. The length is instead highly dependent on insulation pollution.

Only three vented water trees were found during the project. This shows that the test period of three weeks is too short to reach any conclusions about vented water trees.



# Innhold

Figurliste: .....	xii
Tabeller:.....	xvi
Formelliste:.....	xvii
1 Introduksjon .....	1
1.1 Formål.....	1
1.2 Bakgrunn .....	1
1.3 Arbeidsomfanget til studiet.....	1
1.4 Hypotese.....	2
1.4.1 Diffusjon og absorpsjon.....	2
1.4.2 Innefryste krefter .....	3
1.4.3 Resultater fra prosjektoppgaven.....	3
1.4.4 Samlet hypotese .....	3
2 Teori.....	4
2.1 Vanntre – Historie .....	4
2.2 Initiering og vekst av vanntre.....	4
2.3 Typer av vanntre .....	6
2.4 Kryssbundet polyetylen (XLPE/PEX) .....	8
2.4.1 Polyetylen .....	8
2.4.2 Kryssbinding .....	9
2.5 Halvledere .....	10
2.6 Ekstrudering .....	11
2.7 Vulkanisering .....	12
2.8 Innefryste krefter .....	12
2.9 Termisk aldring .....	13
2.10 Elektrisk felt .....	14
2.11 Diffundering av vann i polymerer.....	14
3 Metodikk .....	16
3.1 Kablenes utgangspunkt .....	16
3.2 Kabelens dimensjoner .....	17
3.3 Tre ulike typer prøveobjekter.....	17
3.4 Testtrigg .....	17
3.5 Fremstilling av prøveobjekter .....	18

3.5.1 Prøveobjekter uten leder .....	18
3.5.2 Prøveobjekter med leder.....	26
3.6 Oppkobling av vannsystemet .....	27
3.6.1 Vanntanken .....	27
3.6.2 Varmeelementet .....	28
3.6.3 Vannpumpe .....	28
3.6.4 Isolering av vannrørene og plassering av temperatursensorer .....	28
3.6.5 Plastslanger .....	29
3.7 Oppkobling av det elektriske.....	30
3.7.1 Variacen.....	30
3.7.2 Transformatoren og samleskinnen .....	31
3.7.3 Koronaringer og jordingsledninger.....	31
3.8 Vanntreanalyse.....	32
3.8.1 Oppsnitting.....	32
3.8.2 Innfarging med metylenblått.....	33
3.8.3 Mikroskopsanalyse .....	35
4 Problemer i lab .....	39
4.1 Vannlekkasjer i tredje gjennomkjøring .....	39
4.2 Fjerde gjennomkjøring .....	41
4.3 Endring i temperaturmålerne.....	41
4.4 Varmgang i varmeelement .....	41
4.5 Følger av problemene .....	42
5 Resultater .....	43
5.1 Krymping av prøveobjektene .....	43
5.2 Mikroskopsanalyse.....	43
5.2.1 Resultater fra første gjennomkjøring, 40 °C.....	44
5.2.2 Resultater fra andre gjennomkjøring, 18 °C.....	44
5.2.3 Resultater fra tredje gjennomkjøring, 60 °C.....	45
5.2.4 Resultater fra fjerde gjennomkjøring, 60 °C.....	46
5.2.5 Fremstillinger.....	46
5.2.6 Observasjoner .....	56
5.2.7 Ventilerte vantrær.....	61
6 Diskusjon .....	62
6.1 Krympelengde .....	62

6.2 Effekten av temperaturer og mekaniske spenninger på vanntrevekst.....	62
6.2.1 Effekten av de to temperaturfallene.....	62
6.2.2 Effekten av mekaniske spenninger på antall vanntreer.....	63
6.2.3 Effekten av temperaturer på antall vanntreer.....	65
6.2.3 Effekten av temperaturer og mekaniske spenninger på trelengden.....	66
6.3 Ventilerte vanntreer.....	66
6.4 Feilkilder.....	66
7 Konklusjon.....	67
8 Forslag til videre arbeid.....	67
Referanseliste.....	68
Vedlegg.....	I
Vedlegg A: Bilder av vanntreer.....	I
Vedlegg B: Elektrisk feltfordeling i kabler.....	V
Vedlegg C: Volumberegninger.....	V
Vedlegg D: Temperaturfall.....	VI
Vedlegg E: Utstyrsbeskrivelse og rørdimensjoner.....	X
Rørdimensjoner:.....	X
Utskyrsbeskrivelse:.....	X
Vedlegg F: Fremstillinger av resultater som ikke ble med i hovedteksten.....	XXI

## Figurliste:

Figur 2.1:	Illustrasjon av den mekaniske modellen med kondensert vann i enden av sprekken og Maxwellkreftene [2]	Side 5
Figur 2.2:	Illustrasjon av de to trefypene og deres plassering i isolasjonen [2]	Side 6
Figur 2.3:	Eksempel på et ventilert vanntre, funnet i mikroskopanalysen	Side 7
Figur 2.4:	Eksempel på et sløyfetre (bow-tie tree), funnet i mikroskopanalysen	Side 7
Figur 2.5:	En graf som viser en typisk vekstrate for de to trefypene [2]	Side 8
Figur 2.6:	Strukturen til en polymer med krystalliserte (A) og amorfe regioner (B) [1]	Side 9
Figur 2.7:	Illustrasjon av en halvleders resistivitet, gitt av sotinnhold [1]	Side 10
Figur 2.8:	Illustrasjon av ekstruderen [1]	Side 11
Figur 2.9:	Illustrasjon av ekstruderingshodet der isolasjonen påføres lederen [1]	Side 11
Figur 2.10:	Illustrasjon som viser de innefryste kreftene i isolasjonen	Side 12
Figur 2.11:	Aldring av PEX-kabel. Levetiden minker ved høyere temperaturer [16]	Side 13
Figur 2.12:	Absorbering av vann i forhold til den inverse av temperaturen [1]	Side 15
Figur 3.1:	Illustrasjon som viser kabelens oppbygning og lag [2]	Side 16
Figur 3.2:	Tverrsnitt av kabelen [2]	Side 17
Figur 3.3:	Illustrasjon som viser oppsettet av testtriggen med prøveobjekt [2]	Side 18
Figur 3.4:	(V) Plastrøret plassert på kabelen, (H) Kablene hengt opp til gjennomstrømning [8]	Side 19
Figur 3.5:	Isolasjonen holdes tilbake av trucken mens lederen dras ut av kranen [8]	Side 20
Figur 3.6:	Oppbyggingen av vannrøret med messinghylsene [8]	Side 21
Figur 3.7:	Vann tett forsegling, to metallskiver med gummipakning mellom [2]	Side 22
Figur 3.8:	Illustrasjon av festepunktet med lederkjerne [2] med bilde av det faktiske festepunktet [8]	Side 22
Figur 3.9:	Illustrasjon av festepunktet med stålrør [2] med bilde av det faktiske festepunktet [8]	Side 23
Figur 3.10:	(V) Stresskone og silikonpaste, (H) Stresskone plassert på en av kabelendene [8]	Side 24
Figur 3.11:	Plastrør festet med rørklemme i enden av den blottede ledergangen [8]	Side 25
Figur 3.12:	Et ferdiglaget prøveobjekt uten leder klar for installasjon	Side 25
Figur 3.13:	Et ferdiglaget prøveobjekt med leder klar for installasjon	Side 27
Figur 3.14:	Sensor festet på ett vannrør med elektriker strips	Side 29
Figur 3.15:	Oppkoblingen av vanntilførselssystemet	Side 30
Figur 3.16:	(V) Avlang koronaring ved aluminiumssamleskinne, (M) Koronaringer ved endeavslutningene, (H) Koronaring	Side 32
Figur 3.17:	(V) Mikrotomet, (M) en av kabeldelene festet i mikrotomet og (H) tre ferdige snitt [8]	Side 33
Figur 3.18:	(V) Snitt festet til en ståltråd, (M) varmeskapet med to magnetrørere og (H) vannbad med snitt oppi [8]	Side 35
Figur 3.19:	Preparering av snitt til analysen	Side 36
Figur 3.20:	Isolasjonens inndeling av soner [2]	Side 37
Figur 4.1:	Graf som viser temperaturfallet 8. november 2014	Side 40



Figur 4.2:	Graf som viser temperaturfallet 11. november 2014	Side 40
Figur 5.1:	Grafer som viser antall vanntrær for prøveobjekter ved 18 °C	Side 47
Figur 5.2:	Standardavvik som viser effekten av strekk for prøveobjekter ved 18 °C	Side 47
Figur 5.3:	Grafer som viser antall vanntrær for prøveobjekter ved 40 °C	Side 48
Figur 5.4:	Standardavvik som viser effekten av strekk for prøveobjekter ved 40 °C	Side 48
Figur 5.5:	Grafer som viser antall vanntrær for prøveobjekter ved 60 °C	Side 49
Figur 5.6:	Grafer som viser antall vanntrær for prøveobjekter ved første gjennomkjøring ved 60 °C	Side 50
Figur 5.7:	Standardavvik som viser effekten av strekk for prøveobjekter ved første gjennomkjøring ved 60 °C	Side 50
Figur 5.8:	Grafer som viser antall vanntrær for prøveobjektet med leder, uten strekk	Side 51
Figur 5.9:	Standardavvik som viser effekten av temperatur for prøveobjektet med leder, uten strekk	Side 51
Figur 5.10:	Grafer som viser antall vanntrær for prøveobjektet uten leder, med strekk	Side 52
Figur 5.11:	Standardavvik som viser effekten av temperatur for prøveobjektet uten leder, med strekk	Side 52
Figur 5.12:	Grafer som viser antall vanntrær for prøveobjektet uten leder, uten strekk	Side 53
Figur 5.13:	Standardavvik som viser effekten av temperatur for prøveobjektet uten leder, uten strekk	Side 53
Figur 5.14:	Grafer som viser gjennomsnittlig maksimal vanntrelengde for samtlige prøveobjekter	Side 54
Figur 5.15:	Grafer som viser gjennomsnittlig maksimal vanntrelengde for samtlige prøveobjekter med unntak av første gjennomkjøring av 60 °C	Side 54
Figur 5.16:	Standardavvik som viser effekten av temperaturer på gjennomsnittlig maksimal trelengde for samtlige prøveobjekter med unntak av første gjennomkjøring ved 60 °C	Side 55
Figur 5.17:	Standardavvik som viser effekten av strekk for samtlige prøveobjekter med unntak av første gjennomkjøring ved 60 °C	Side 56
Figur 5.18:	Tetthet av vanntrær ved indre halvleder ved 18 °C	Side 57
Figur 5.19:	Tetthet av vanntrær ved indre halvleder ved 40 °C	Side 57
Figur 5.20:	Tetthet av vanntrær ved indre halvleder ved andre gjennomkjøring ved 60 °C	Side 58
Figur 5.21:	Tetthet av vanntrær ved indre halvleder ved første gjennomkjøring ved 60 °C	Side 58
Figur 5.22:	Tetthet av vanntrær ved ytre halvleder ved 18 °C	Side 59
Figur 5.23:	Tetthet av vanntrær ved ytre halvleder ved 40 °C	Side 59
Figur 5.24:	Tetthet av vanntrær ved ytre halvleder ved andre gjennomkjøring ved 60 °C	Side 60
Figur 5.25:	Tetthet av vanntrær ved ytre halvleder ved første gjennomkjøring ved 60 °C	Side 60
Figur A.1:	Det største vanntreet i prøveobjektet med leder, uten strekk ved 18 °C	Side I

Figur A.2:	Det største vanntreet i prøveobjektet uten leder, med strekk ved 18 °C	Side I
Figur A.3:	Det største vanntreet i prøveobjektet uten leder, uten strekk ved 18 °C	Side I
Figur A.4:	Det største vanntreet i prøveobjektet med leder, uten strekk ved 40 °C	Side II
Figur A.5:	Det største vanntreet i prøveobjektet uten leder, med strekk ved 40 °C	Side II
Figur A.6:	Det største vanntreet i prøveobjektet uten leder, uten strekk ved 40 °C	Side II
Figur A.7:	Det største vanntreet i prøveobjektet med leder, uten strekk ved første gjennomkjøring av 60 °C	Side II
Figur A.8:	Det største vanntreet i prøveobjektet uten leder, med strekk ved første gjennomkjøring av 60 °C	Side III
Figur A.9:	Det største vanntreet i prøveobjektet uten leder, uten strekk ved første gjennomkjøring av 60 °C	Side III
Figur A.10:	Det største vanntreet i prøveobjektet med leder, uten strekk ved andre gjennomkjøring av 60 °C	Side III
Figur A.11:	Et av de få ventilerte vanntrærne funnet i denne oppgaven. Treet ble funnet ved den indre halvlederen i prøveobjektet uten leder, med strekk ved 18 °C.	Side IV
Figur A.12:	Et av de få ventilerte vanntrærne funnet i denne oppgaven. Treet ble funnet ved den indre halvlederen i prøveobjektet med leder, uten strekk ved 40 °C.	Side IV
Figur A.13:	Et av de få ventilerte vanntrærne funnet i denne oppgaven. Treet ble funnet ved den indre halvlederen i prøveobjektet uten leder, uten strekk ved 40 °C.	Side IV
Figur E.1:	Kabelskreller	Side X
Figur E.2:	Kabelpresse	Side XI
Figur E.3:	Tverrsnitt av en stresskone	Side XII
Figur E.4:	Det første varmeelementet som ble benyttet	Side XII
Figur E.5:	Vannpumpe	Side XIII
Figur E.6:	Temperaturmålere og loggesystem	Side XIV
Figur E.7:	Variacen	Side XV
Figur E.8:	Transformator	Side XVI
Figur E.9:	Mikrotom	Side XVII
Figur E.10:	Magnettrører	Side XVIII
Figur E.11:	Mikroskop og analysesystem	Side XIX
Figur E.12:	Det andre varmeelementet som ble benyttet	Side XX
Figur F.1:	Effekt av strekk for prøveobjekter ved 60 °C	Side XXI
Figur F.2:	Antall vanntrær for prøveobjekter med leder og uten strekk	Side XXII
Figur F.3:	Effekt av temperatur for prøveobjekter med leder og uten strekk	Side XXII
Figur F.4:	Antall vanntrær for prøveobjektet uten leder og med strekk	Side XXIII
Figur F.5:	Effekt av temperatur for prøveobjektet uten leder og med strekk	Side XXIII
Figur F.6:	Antall vanntrær for prøveobjektet uten leder og uten strekk	Side XXIV
Figur F.7:	Effekt av temperatur for prøveobjektet uten leder og uten strekk	Side XXIV
Figur F.8:	Antall vanntrær for samtlige prøveobjekter	Side XXV
Figur F.9:	Effekten av endringer for samtlige prøveobjekter	Side XXV

Figur F.10:	Gjennomsnittlig maksimal trelengde for samtlige prøveobjekter	Side XXVI
Figur F.11:	Grafer som viser antall vanntrær for samtlige prøveobjekter med unntak av første gjennomkjøring ved 60 °C	Side XXVI
Figur F.12:	Standardavvik som viser effekten av endringer for samtlige prøveobjekter med unntak av første gjennomkjøring ved 60 °C	Side XXVII

## Tabeller:

Tabell 5.1:	Krympingen av de 12 målingene	Side 43
Tabell 5.2:	Gjennomsnittlig antall vantrær ved 40 °C	Side 44
Tabell 5.3:	Gjennomsnittlig antall vantrær per volum ved 40 °C	Side 44
Tabell 5.4:	Standardavviket for gjennomsnittlig antall vantrær ved 40 °C	Side 44
Tabell 5.5:	Gjennomsnittlig maksimal trelengde ved 40 °C	Side 44
Tabell 5.6:	Gjennomsnittlig antall vantrær ved 18 °C	Side 44
Tabell 5.7:	Gjennomsnittlig antall vantrær per volum ved 18 °C	Side 44
Tabell 5.8:	Standardavviket for gjennomsnittlig antall vantrær ved 18 °C	Side 45
Tabell 5.9:	Gjennomsnittlig maksimal trelengde ved 18 °C	Side 45
Tabell 5.10:	Gjennomsnittlig antall vantrær ved første gjennomkjøring ved 60 °C	Side 45
Tabell 5.11:	Gjennomsnittlig antall vantrær per volum ved første gjennomkjøring ved 60 °C	Side 45
Tabell 5.12:	Standardavviket for gjennomsnittlig antall vantrær ved første gjennomkjøring ved 60 °C	Side 45
Tabell 5.13:	Gjennomsnittlig maksimal trelengde ved første gjennomkjøring ved 60 °C	Side 45
Tabell 5.14:	Gjennomsnittlig antall vantrær ved andre gjennomkjøring ved 60 °C	Side 46
Tabell 5.15:	Gjennomsnittlig antall vantrær per volum ved andre gjennomkjøring ved 60 °C	Side 46
Tabell 5.16:	Standardavviket for gjennomsnittlig antall vantrær ved andre gjennomkjøring ved 60 °C	Side 46
Tabell 5.17:	Gjennomsnittlig maksimal trelengde ved andre gjennomkjøring ved 60 °C	Side 46
Tabell D.1:	Verdier benyttet i fremstillingen av temperaturfallet 08.11.2014	Side VI
Tabell D.2:	Verdier benyttet i fremstillingen av temperaturfallet 11.11.2014	Side VII
Tabell E.1:	Merkeverdier, kabelpresse	Side XI
Tabell E.2:	Merkeverdier, varmeelement	Side XIII
Tabell E.3:	Merkeverdier, vannpumpe	Side XIII
Tabell E.4:	Innstillinger, vannpumpe	Side XIII
Tabell E.5:	Merkeverdier 1, transformator	Side XVI
Tabell E.6:	Merkeverdier 2, transformator	Side XVI
Tabell E.7:	Merkeverdier 3, transformator	Side XVII
Tabell E.8:	Merkeverdier, magnetrører	Side XVIII
Tabell E.9:	Merkeverdier, varmeelement	Side XX

## Formelliste:

Formel 1	Maxwellkrefter per arealenhet	Side 5
Formel 2	Maxwellkrefter per arealenhet i grenseflaten, gitt elektrisk ledende vann	Side 5
Formel 3	Arrhenius lov	Side 13
Formel 4	Materialets levetid	Side 13
Formel 5	Materialets levetid, med hensyn på forhold mellom temperaturer	Side 13
Formel 6	Elektrisk felt, gitt av $r$	Side 14
Formel 7	Gjennomsnittlig elektrisk felt	Side 14
Formel 8	Volum ved ytre halvleder	Side 37
Formel 9	Volum ved indre halvleder	Side 37
Formel 10	Volum av hele isolasjonen	Side 37
Formel 11	Gjennomsnittlig antall vantrær	Side 38
Formel 12	Gjennomsnittlig maksimal vanntrelengde	Side 38
Formel 13	Standardavvik	Side 38

# 1 Introduksjon

## 1.1 Formål

Formålet med denne oppgaven er å studere i hvor stor grad ulike temperaturer og mekaniske krefter påvirker antall initieringer av vanntreer og deres vekstrate i kabelisolasjonen. Isolasjonen som i denne oppgaven blir benyttet er kryssbundet polyetylen (PEX) som sammen med halvledere er blitt trippelkstrudert på en kobberleder. Ved å kjøre flere gjennomkjøringer, vil det være mulig å teste ulike mekaniske krefter parallelt ved samme temperatur, for så siden å endre temperatur. Dette vil gi et godt grunnlag for sammenligning og diskusjon av de ulike faktorenes innvirkning.

## 1.2 Bakgrunn

Dersom en PEX-isolert kabel påtrykkes en alternerende spenning samtidig som den utsettes for fuktige forhold, oppstår det vanntreer i isolasjonen [1]. Disse vanntreerne vil sakte men sikkert bryte ned isolasjonen og redusere kabelens levetid betraktelig før de fører til at kabelen bryter sammen. Det faktum at en reduksjon i levetid og motstand både vil være problematisk under drift og kostbart ved feil, har ført til at interessen for forskning innen feltet er stor. Interessen har også vokst i de senere år når det har blitt ønskelig å flytte kraftproduksjon offshore. Med bakgrunn i dette er det besluttet å forske på vanntrevekst, med vekt på noen av de faktorene som virker inn på treveksten.

Tidligere forskning har vist at det i kabler som utsettes for statiske krefter produseres flere vanntreer enn i kabler som ikke utsettes for de samme kreftene [2][3][4][5][6][7]. I prosjektoppgaven som ble gjennomført våren 2014 [8] ble det undersøkt i hvilken grad temperaturendringer virket inn på treveksten, og de ble da konkludert med at antallet vanntreer ved den ytre halvlederen først synker ved høyere temperatur før antallet stiger, samtidig som det motsatte oppstod ved midtre del av isolasjon og ved den indre halvlederen. Det kom også frem i denne oppgaven at den gjennomsnittlige lengste lengden avtok ved økende temperaturer. Disse tidligere observasjonene vil være viktige i arbeidet som utføres i denne oppgaven.

## 1.3 Arbeidsomfanget til studiet

De faktorene som vil bli undersøkt i denne oppgaven er vanntemperatur og statiske krefter. Vanntemperaturen vil endres ved å tilføre oppvarmet vann direkte på den ytre halvlederen ved hvert prøveobjekt. Da det kun er en vannpumpe tilgjengelig, må det gjennomføres en gjennomkjøring for hver temperatur. Dette vil da si at det vil bli gjennomført tre gjennomkjøringer ved tre ulike temperaturer; 18 °C, 40 °C og 60 °C. Ved hver gjennomkjøring skal tre prøveobjekter kobles til systemet. Disse prøveobjektene skal utsettes for ulike mekaniske krefter. Et av prøveobjektene skal kobles til systemet uten andre mekaniske krefter enn de som oppstår under produksjonen, et annet

objekt skal kobles opp uten leder og strekkes slik at det opplever et statisk strekk på 2 %, og det siste skal kobles opp uten leder og uten strekk. Til sammen vil det da bli behov for å lage ni prøveobjekter, der lederen trekkes ut i seks av dem. Det antas at det er ved produksjonen av disse prøveobjektene at mesteparten av arbeidet blir lagt.

Etter at hver gjennomkjøring har stått spenningsatt i tre uker, vil det fra hvert prøveobjekt lages ti snitt. Disse snittene vil så bli fargebehandlet, før de analyseres i et mikroskop. Til sammen 90 snitt skal behandles og analyseres, noe som er en tidkrevende prosess.

## 1.4 Hypotese

Da vanntrevekst er en komplisert prosess som er avhengig av flere faktorer er det valgt først å se på de ulike faktorene hver for seg og sammenligne dem med resultatene fra prosjektoppgaven, for så å lage en samlet hypotese.

### 1.4.1 Diffusjon og absorpsjon

Tidligere studier viser at diffusjonen av vann i en PEX-isolert kabel er avhengig av temperaturen [9]. Dersom temperaturen øker vil både diffusjonen og absorpsjonen av vann øke. Dette kommer av at de krystalliserte områdene i PEX-isolasjonen vil gå over i en amorf fase når temperaturen øker. Samtidig vil vannet som allerede eksisterer i kabelisolasjonen ekspandere og skape et indre trykk. Disse faktorene gir ideelle vekstforhold, og det antas derfor at flere trær vil initiere og bli lengre ved høyere temperaturer.

Vanntreveksten er også avhengig av mengden tilført vann [2]. I oppgaven vil det tilføres vann både direkte inn i ledergang og direkte på ytre halvleder. Da de to halvlederne har ulike arealer som er i kontakt med vann, antas det at det tilføres mer vann ved den ytre halvlederen. Dette kan medføre at forholdene for vanntrevekst er bedre ved den ytre halvlederen, noe som kan gi flere trær. I oppgaven vil det også føres vann inn i ledergangen i de prøveobjektene som fremdeles har lederen intakt. I disse prøveobjektene vil arealet som tilføres vann bli redusert da kordelene er i veien. Dette antas å gi større forskjeller i forholdet mellom antall trær ved den ytre og den indre halvlederen.

Ut ifra prinsippene om diffusjon og absorpsjon antas det at det ved økende temperaturer vil det bli produsert flere vanntreer, og da spesielt ved den ytre halvlederen.

### 1.4.2 Innefryste krefter

Når de ulike isolasjonslagene ekstruderes på kobberlederen, vil de ytre lagene avkjøles hurtigere enn de indre. Dette resulterer i at ulike krefter fryser inne i isolasjonen. I hovedsak fryses kompresjonskrefter inne ved den ytre halvlederen mens strekkrefter fryses inne ved den indre halvlederen. Tidligere studier har vist at disse kreftene vil gjøre det vanskeligere for vanntreer å initiere ved den ytre halvlederen, og enklere å initiere ved den indre halvlederen [10]. I denne oppgaven vil lederen fjernes fra noen av prøveobjektene, noe som antas vil frigjøre noen av de innefryste kreftene. I tillegg antas det at noen av kreftene vil avta når temperaturen øker og isolasjonen blir mer amorf [2].

Dersom hypotesen settes kun ved å vise hensyn til de innefryste kreftene, antas det at de fleste vanntreerne vil oppstå ved den indre halvlederen der kreftene er sterkest og det elektriske feltet størst. Det antas også at forskjellen mellom indre og ytre halvleder vil avta ved økende temperaturer da dette vil redusere noen av kreftene i isolasjonen og gi likere forhold.

### 1.4.3 Resultater fra prosjektoppgaven

I prosjektoppgaven viste resultatene at det oppstod flest trær ved den ytre halvlederen uansett temperatur, og at forholdstallet mellom ytre og indre halvleder endret seg minimalt. Det kom også frem av resultatene at lengden på trærne avtok ved økende temperaturer [8].

Det må nevnes at disse tallene er ikke oppgitt per volum, og gir derfor ikke helt korrekte resultater siden volumet ved den ytre halvlederen er større enn volumet ved den indre halvlederen. I konklusjonen ble det også lagt vekt på at det ble observert mange flere vanntreer ved den indre halvlederen, men at disse var for små til å telles og brukes i resultatene.

### 1.4.4 Samlet hypotese

Det velges i denne oppgaven å legge vekt på de resultater som ble funnet, og de observasjoner som ble gjort, i prosjektoppgaven når en felles hypotese skal settes. I de tilfeller der antagelser og resultater fra prosjektoppgaven ikke stemmer over ens velges det derfor å anta at prosjektoppgaven gir de beste resultatene for videre arbeide.

Det antas derfor at:

- antallet vanntreer av signifikant størrelse, ved den ytre halvlederen, vil øke ved økende temperatur
- tettheten av vanntreer vil være størst ved den indre halvlederen, men flertallet av trærne er for små til å telles med i resultatene
- den gjennomsnittlige lengden på vanntreerne vil minke ved økende temperaturer



## 2 Teori

### 2.1 Vanntreær – Historie

Helt siden kabler først ble tatt i bruk for å frakte elektrisk kraft, har det vært fokus på forskning av de ulike nedbrytningsmekanismene. Så tidlig som i 1969 ble det publisert en oppgave som omhandlet en nedbrytningsmekanisme i polyetylen (PE) som utsettes for både et elektrisk felt og fuktighet [2]. Denne nedbrytningsmekanismen ble senere kjent som vanntrevekst. Vanntrevekst rammer spenningsatte kabler som samtidig blir utsatt for høy fuktighet. Etter oppdagelsen av vanntrevekst har interessen for denne nedbrytningsmekanismen vært stor, og i jakten på å redusere og å forstå denne mekanismen har det blitt gjort flere viktige oppdagelser.

Da det ble klart at vannmengden i kabelisolasjonen akselererer aldringen av kablene, ble det gjort store endringer i både kabeldesign og produksjon for å redusere denne vannmengden. I 1978 ble det introdusert en strippbar ytre halvleder, i 1982 ble tørr herding av isolasjonen introdusert og i 1989 ble et ekspanderende pulver i lederkanalen introdusert [11]. Det har også blitt stilt høyere krav til mengden urenligheter og forurensinger som tillates i isolasjonens smelteblanding før den ekstruderes på kabelen. I det siste har det blitt introdusert nye vanntrehekkende materialer (water tree retarding materials) som skal redusere muligheten for vanntreinitieringer, men så langt vil det kunne oppstå vanntreær i alle kjente polymeriske materialer [11].

I Norge ble kryssbundet polyetylen isolasjonen (PEX-isolasjonen) introdusert av Alcatel Kabel Norge AS så tidlig som i 1968 [11]. Da disse kablene også ble eksponert for fuktighet og et elektrisk felt, var det naturlig at det også her oppstod problemer med vanntrealdring. I tidsperioden 1984 til 1985 ble de første feilene forårsaket av vanntreær oppdaget.

Interessen for vanntrevekst har hele tiden vært stor, men er satt mer i fokus i dagens samfunn. Dette kommer av at flere og flere elektriske komponenter flyttes fra fastlandet til offshore, på plattformer av forskjellige slag eller på havbunnen. På havet utsettes kablene for mer ekstreme forhold enn det som tidligere har vært vanlig, og det er derfor et større behov for ny og forbedret forskning.

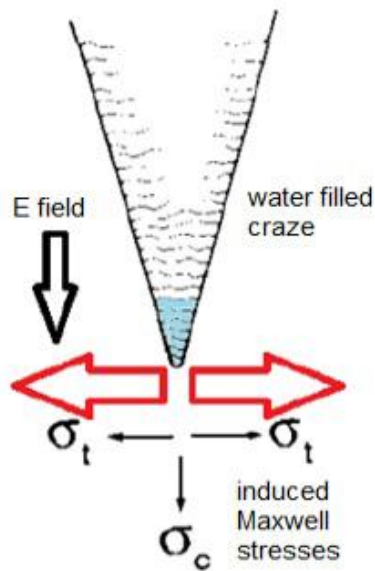
### 2.2 Initiering og vekst av vanntreær

Vanntreær er trelignende strukturer som oppstår i isolasjonen når den utsettes for fuktighet, samtidig som den påtrykkes en alternerende spenning. Spenningen setter så opp et elektrisk felt som virker radielt ut ifra lederen mot den ytre halvlederen. Det er parallelt med de elektriske feltlinjene de ulike vanntrestrukturene dannes. Det finnes fortsatt ikke en endelig forklaring på hvordan et vanntre initierer eller vokser, men det er lagt frem flere teorier som prøver å forklare fenomenet. Disse teoriene deles vanligvis inn i to hovedretninger, en mekanisk og en elektrokjemisk modell [9][11][1][2]:

Den **mekaniske modellen** antar at vanntreær oppstår i små defekter i kabelisolasjonen som ble til under produksjonen av kabelen [12]. Årsaken til at det dannes slike hulrom eller sprekker er som

regel forurensinger eller luft i polymerblandingen, eller feil i ekstruderingen av isolasjonen. Når kabelen tar opp vann fra omgivelsene vil vannet samle seg i hulrommene og der kondensere. Det kondenserte vannet vil samle seg i de skarpe kantene i sprekke, eller hulrommene, og gi en lokal feltforsterkning [9][2].

Samtidig som kabelen utsettes for fuktige omgivelser påtrykkes det en alternerende spenning som setter opp et varierende elektrisk felt som igjen produserer Maxwellkrefter [2][3][7]. Maxwellkreftene setter så bevegelse i vannmolekylene i hulrommene slik at de støter vinkelrett mot grenseflaten mellom sprekk og isolasjon. Disse støtene, i kombinasjon med kreftene som virker på vannmolekylene fra det elektriske feltet, skaper så store krefter at isolasjonen brytes opp og penetreres av vannet [13]. Disse nye hulrommene vil så fylles opp med kondensert vann, og prosessen gjentar seg. Figuren under viser hvordan vannet i et hulrom påvirkes av de ulike kreftene, og penetrerer isolasjonen.



Figur 2.1: Illustrasjon av den mekaniske modellen med kondensert vann i enden av sprekken og Maxwellkreftene [2]

Maxwellkreftene per arealenheter er gitt av formelen [1][2][3]:

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

Der  $\epsilon_1$  og  $\epsilon_2$  er permittiviteten til de to materialene og  $E_{n1}$  og  $E_{t1}$  er den normale og tangentielle komponenten til det elektriske feltet i grenseoverflaten. Dersom det antas at den vannfylte sprekken er elektrisk ledende kan kreftene per arealenheter i grenseflaten skrives som:

$$\sigma = \frac{1}{2}(\epsilon_0 \epsilon_r E^2) \quad (2)$$

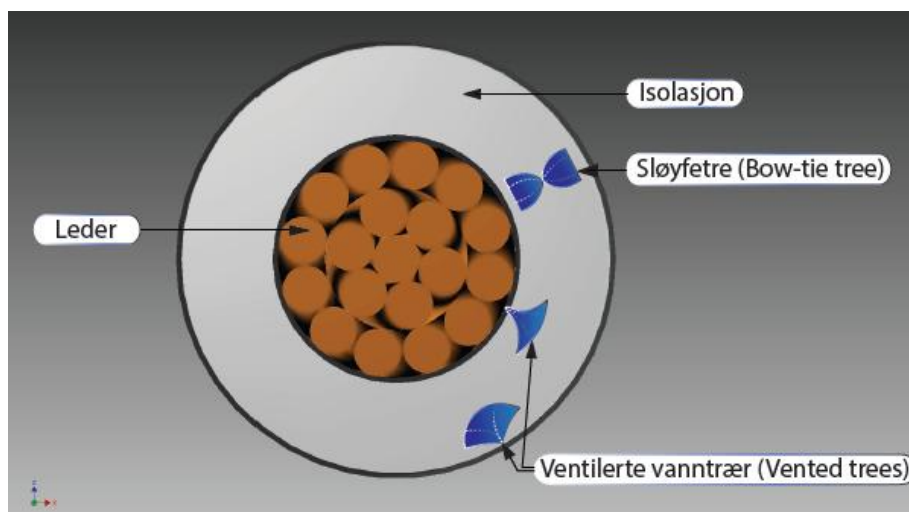
Der  $\epsilon_0$  er vakuumets permittivitet,  $\epsilon_r$  er den relative permittiviteten og  $E$  er den elektriske feltstyrken.

Den **elektrokjemiske modellen** antar at veksten av vanntrær er et resultat av lokale kjemiske reaksjoner som påvirkes av det elektriske feltet [11]. Disse reaksjonene omformer deler av isolasjonen til trådformede strukturer samtidig og det blir dannet hydrofile grupper som absorberer mer fuktighet og øker diffusjonen. Disse delene av isolasjonen er ideelle for kondensering av vann [9][11].

Selv med ulike modeller er forskerne enige om at vanntrevekst krever initieringssted, et alternerende elektrisk felt og en relativ fuktighet høyere enn 70 % [11][2]. Det er oppdaget vanntrevekst i isolasjon med et elektrisk felt lavere enn 1kV/mm [9][11][2], noe som viser at feltet ikke trenger være så sterkt for at vanntrær skal initieres. En annen ting forskerne er enige om er at det elektriske feltet virker radielt ut fra lederen, og at dette er årsaken til vanntrærne sin orientering i isolasjonen. Vanntrærne vokser parallelt med de elektriske feltlinjene.

### 2.3 Typer av vanntrær

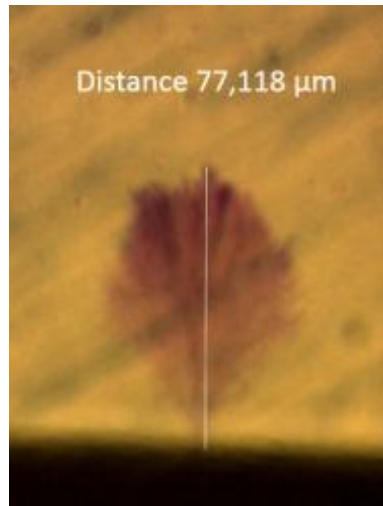
Det har opp igjennom tiden blitt gitt mange navn til de ulike typene av vanntrær, i hovedsak gitt ut ifra utseende og form. Som regel deles typer vanntrær inn i to kategorier, ventilerte trær (eng.: vented trees) og sløyfetrær (eng.: bow-tie trees). Gruppene deles som regel opp på denne måten siden de initierer på helt ulike steder, og ser helt ulike ut. Bildet under viser de to typene vanntrær og hvor de normalt initieres.



Figur 2.2: Illustrasjon av de to treetypene og deres plassering i isolasjonen [2]

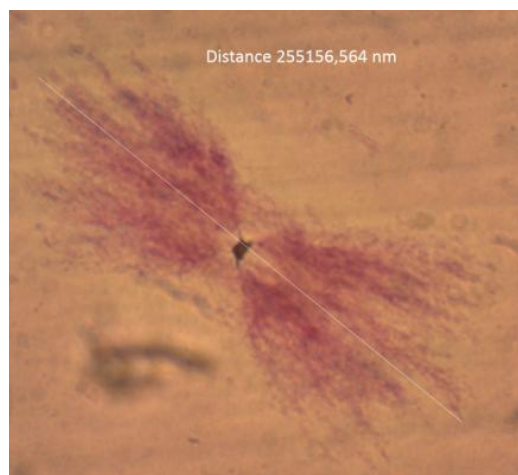
**Ventilerte trær** er vanntrær som har sitt initieringspunkt i grenseflaten mellom isolasjonen og de to halvlederene. Det er derfor mulig at ventilerte trær oppstår både ytterst og innerst av isolasjonen. Fra initieringspunktene vil treet vokse i en fast retning, innover ved ytre halvleder og utover ved indre halvleder. Veksten starter med en forgrening, som fordeler seg utover i flere forgreninger, før flere forgreninger vokser ut av initieringspunktet. Denne måten vekst fører til et veldig bredt tre med en form som ligner på en utbrettet håndvifte.

Siden fuktigheten i omgivelsene tas opp via den ytre halvlederen, er det normalt å anta at trærne som vokser her har en konstant tilførsel av fuktighet. Dette gir trærne muligheten til å vokse kontinuerlig i en tilnærmet konstant fart så lenge alle kriterier er møtt. Dersom treet tillates å vokse, vil det til slutt lage en sammenhengende forgrening mellom de to halvlederne, som fører til gjennomslag og sammenbrudd av kabelen. Siden ventilerte trær kan føre til sammenbrudd, blir de sett på som de mest alvorlige typene av vanntreer [2][13][14][4][6].

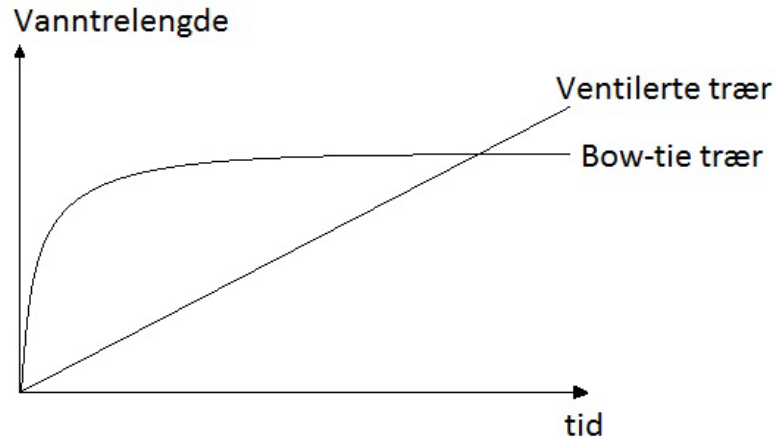


Figur 2.3: Eksempel på et ventilert vanntre, funnet i mikroskopanalysen

**Sløyfetrær** (som regel kalt med sitt engelske navn: bow-tie trær) er trær som ikke har sitt initieringspunkt på grenseflatene mellom isolasjon og halvledere, men i selve isolasjonen. Da disse trærne ikke er begrenset av noen grenseflate, vil de som regel vokse i begge retninger parallelt med det elektriske feltet. Dette fører til at det dannes trær med utrolig symmetri. De symmetriske formene ser ofte ut som sløyfer der forgreninger skyter ut fra initieringspunktet i begge retninger. Bow-tie trærne vokser veldig raskt i startfasen, før veksten avtar. Dette kommer av at vanntilførselen er begrenset da det ikke er kontinuerlig tilførsel av vann. Da veksten av denne typen trær etter en stund stopper opp, anses ikke disse trærne som like alvorlige som ventilerte trær.



Figur 2.4: Eksempel på et sløyfetre (bow-tie tree), funnet i mikroskopanalysen



Figur 2.5: En graf som viser en typisk vekstrate for de to tretypene [2]

## 2.4 Kryssbundet polyetylen (XLPE/PEX)

De kablene som skal undersøkes i denne oppgaven inneholder isolasjon av kryssbundet polyetylen, ofte forkortet PEX. Dette er den polymeren som er mest brukt som isolasjon i norske høyspenningskabler.

### 2.4.1 Polyetylen

Utgangspunktet for denne polymeren er polyetylen som består av lange rekker med molekyler med den repeterende enheten  $-CH_2-$ . Polymeren lages ved å polymerisere etylengass ( $C_2H_4$ ) [1]. I fast form er polyetylenet delvis klart eller melkefarget, og ikke helt klar slik den fremstår når den er temperert og i flytende form. Dette kommer av hvordan de lange molekylrekke i polymeren er bundet sammen. I flytende form er molekylrekke ustrukturert koblet sammen, de er alle amorfe, og inneholder ingen krystalliserte strukturer. Dette gir lavere tetthet, noe som får polymeren til å bli klar. Dersom polymeren avkjøles vil det dannes flere krystalliserte strukturer, noe som fører til at tettheten av molekylrekke øker og polymeren blir mindre klar. Polyetylen inneholder i sin normale tilstand en blanding av amorfe og krystalliserte områder, og betegnes derfor som delvis krystallisert.



Figur 2.6: Strukturen til en polymer med krystalliserte (A) og amorfe regioner (B) [1]

Polyetylen inneholder normalt mellom 40-60 % krystalliserte områder, noe som gir et bevegelig og mykt materiale. Dersom tettheten øker, vil materialet bli hardere og få større motstand mot kjemikalier [1]. Siden polyetylen er upolart, vil de elektriske tapene bli veldig små, og ikke være av noe signifikans. Det største problemet med polyetylen er at det har lav toleranse for partielle utladninger, og setter derfor høye krav til materialrenhet, lave luft- og vannmengder.

#### 2.4.2 Kryssbinding

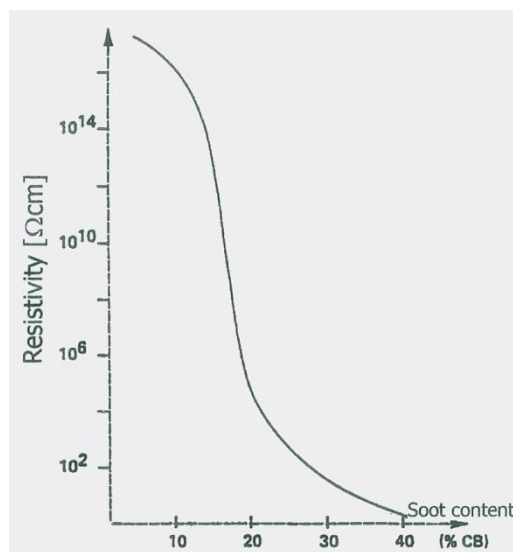
Kryssbundet polyetylen (PEX) fremstilles ved å føre vanlig polyetylen gjennom en vulkaniseringsprosess der det oppstår kjemiske bindinger mellom molekylrekkeene. Disse bindingene øker polymerens smeltepunkt, og hindrer den i å bli flytende ved de normale smeltepunktene. For å lage de kjemiske bindingene, fjernes noen av hydrogenmolekylene i den lange molekylrekken. Hydrogenmolekylene kan fjernes på flere måter [15]:

- Bestråling, der polymeren bestråles med en sterk elektronstråle. I denne prosessen blir hydrogen frigjort fra molekylrekkeene og det dannes mange frie radikaler som reagerer med hverandre og lager kjemiske bindinger. Denne prosessen er ikke den mest gunstige, siden styrken på strålen avtar hurtig ved tykkere lag med isolasjon.
- Kjemisk prosess med silan, der bindinger mellom molekylrekkeene oppstår ved å ta i bruk alcoxysilan [1]. Et lag med silanisert polyetylen blir ekstrudert direkte på resten av polyetylenet, og deretter senket ned i et kar med vann ved 70-80 °C. Denne prosessen er billig og enkel, men det settes spørsmål ved å la isolasjonen ta opp store mengder med vann, da dette kan øke initieringen av vanntrær.
- Kjemisk prosess med peroksid, der organiske peroksider tilsettes polyetylenet før ekstrudering. Etter ekstrudering blir så blandingen varmet opp til rundt 200 °C, slik at peroksidet splittes og danner frie radikaler som i neste omgang reagerer med de lange molekylrekkeene og danner nye frie radikaler. Disse radikalene reagerer med hverandre og

danner bindinger mellom rekkene. I denne prosessen dannes det store mengder biprodukt, men de fjernes ved å produsere kablene ved høyt trykk (20 bar), og lagre dem ved relativt høye temperaturer (60 °C). Dette er den mest brukte metoden for kryssbinding.

## 2.5 Halvledere

I kabelen som skal undersøkes finnes det to lag med halvledere. Den indre halvlederen fører til en jevn overgang mellom leder og isolasjon og ekstruderes direkte på ledere under produksjonen. Den ytre halvlederen sikrer en jevn overgang til omgivelsene, samt at den beskytter mot ytre skader. Begge halvlederne består av en polymer som er forurenset med sot, slik at de blir mer ledende. Figuren under viser hvordan innholdet av sot påvirker resistiviteten til polymeren:

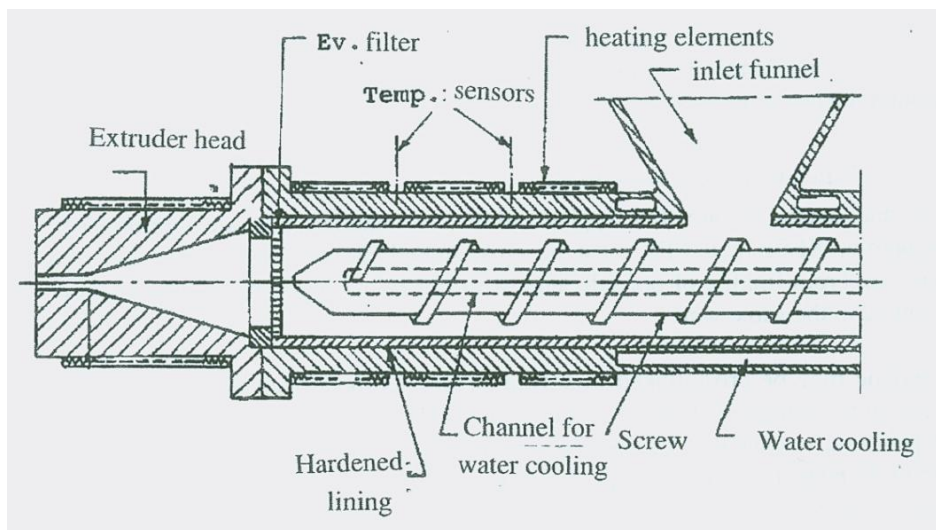


Figur 2.7: Illustrasjon av en halvleders resistivitet, gitt av sotinnhold [1]

En metode for å danne soten er ved å forbrenne brennbart materiale med en begrenset mengde med oksygen. Siden de fleste brennbare materialer er forurenset, vil det dannes biprodukter ved forbrenning. Det har blitt funnet at disse biproduktene i tillegg til andre forurensninger kan virke skadelig på kabelen, og da spesielt med tanke på dannelsen av vanntre [1]. Dette har ført til strengere krav til renhet for soten.

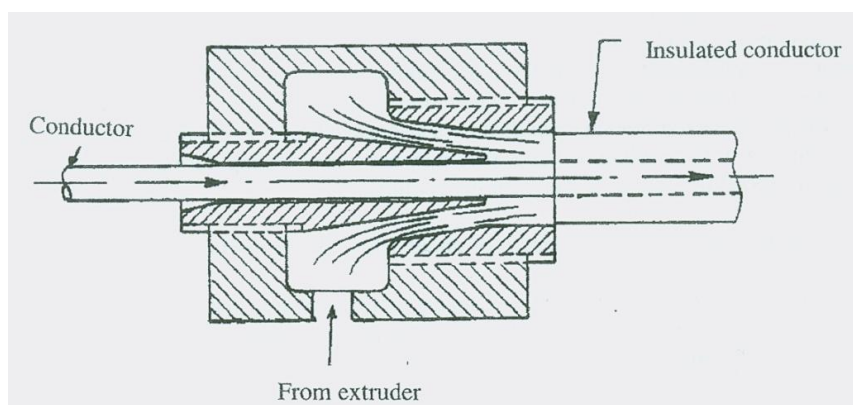
## 2.6 Ekstrudering

Ekstrudering er prosessen der de forskjellige lagene av polymerer påføres direkte på kablen. Prosessen starter ved å føre pelletter av polymeren ned i en kvern. Kvernen består av et langt rør omgitt av varmeelement. I senter av dette røret er det en roterende skruer som presser polymeren fremover i røret. Samtidig som polymeren føres fremover tilføres den varme av varmeelementene. Etter en viss distanse overstiger temperaturen polymerens smeltepunkt, og pelletene transformeres til en viskøs masse. Denne massen føres videre til den fremre enden av kvernen der den renses for urenheter av et filter. Deretter føres massen videre til et ekstruderingshode som påfører polymeren på ledere. Figuren under illustrerer ekstruderingsprosessen.



Figur 2.8: Illustrasjon av ekstruderen [1]

Tidligere ble først den indre halvlederen påført av et ekstruderingshode før isolasjonen sammen med den ytre halvlederen ble påført senere, men da grenseflaten mellom indre halvleder og isolasjon ikke var god nok, har det nå blitt vanlig å benytte et ekstruderingshode som ekstruderer alle tre lag samtidig. Dette kalles tripplekstrudering, og er benyttet i produksjonen av kablene som tas i bruk i denne oppgaven.



Figur 2.9: Illustrasjon av ekstruderingshodet der isolasjonen påføres ledere [1]



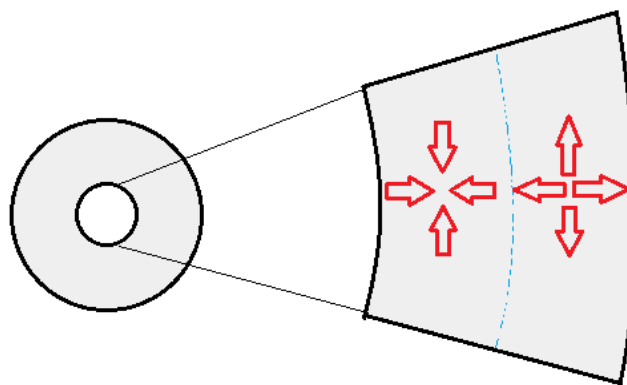
## 2.7 Vulkanisering

Etter ekstruderingsprosessen er de tre lagene varme. Mens de fremdeles er varme blir det ført videre til vulkaniseringsprosessen som fører til kryssbindingen av polymerene. Under vulkaniseringen blir kabelen ført inn i et langt todelt rør med høyt trykk. I den første delen blir kabelen varmet opp, slik at kryssbindingen gjennomføres. I den andre delen blir kabelen nedkjølt slik at polymerene stivner før de kveiles på en kabeltromme. Tidligere ble vanndamp benyttet i vulkaniseringsprosessen, men siden store vannmengder ble dannet i isolasjonen, ble vanndampen skiftet ut med trykksatt nitrogen.

Rørene som benyttes kan enten være plassert horisontalt eller vertikalt, og har begge fordeler og ulemper. Den største ulempen med horisontale rør er at den viskøse kabelmassen fort kan sige og skape en oval kabelform, noe som ikke er ønskelig med tanke på feltfordelinger og kabelstyrke. Fordelen er at røret ikke trenger høye bygninger som er synlige for nærmiljøet. Det vertikale røret vil på den andre siden bli veldig synlige, men det vil i dette røret ikke bli skader på kabelmassen. I Norge benyttes begge typene rør, Nexans i Namsos benytter horisontale rør, mens Nexans i Halden benytter vertikale rør.

## 2.8 Innfryste krefter

I løpet av vulkaniseringsprosessen, vil det oppstå en hurtig nedkjøling av polymerene fra en ytre kilde. Dette fører til at avkjølingen skjer hurtigere ved den ytre halvlederen enn ved den indre. Når den ytre delen av isolasjonen kjøles ned, krymper den og presser mot isolasjonen innenfor. Siden isolasjonen innenfor ikke avkjøles like hurtig, vil det fryses inne komprimerende krefter i isolasjonen nærmest den ytre halvlederen. Når temperaturen begynner å synke ved den indre halvlederen vil isolasjonen krampe, men klarer ikke dette på grunn av at den strekkes mellom den indre halvlederen som er festet til lederen og isolasjonen lengre ute som allerede er stivnet. På denne måten vil isolasjonen ved den indre halvlederen fryse inne strekkrefter [3][5][7]. Disse kreftene antas å virke inn på vanntreveksten, og er derfor en av faktorene som testes i denne oppgaven. Dette gjennomføres ved å fjerne lederen fra noen av prøveobjektene og ved å variere temperaturen kablene utsettes for.



Figur 2.10: Illustrasjon som viser de innefryste kreftene i isolasjonen

## 2.9 Termisk aldring

Siden en av faktorene som endres i denne oppgaven er temperatur, er det viktig å vite hvordan temperatur virker inn på aldringen av kabler. Det er tidligere funnet at en kables levetid er temperaturavhengig, og at forholdet mellom aldring og temperatur kan forklares med Arrhenius lov:

$$R = R' e^{\left(\frac{-W}{KT}\right)} \quad (3)$$

Der  $W$  er aktiveringsenergien,  $K$  er Boltzmanns konstant og  $T$  er absolutt temperatur i kelvin.

Materialets levetid, eller tid til feil, er gitt av:

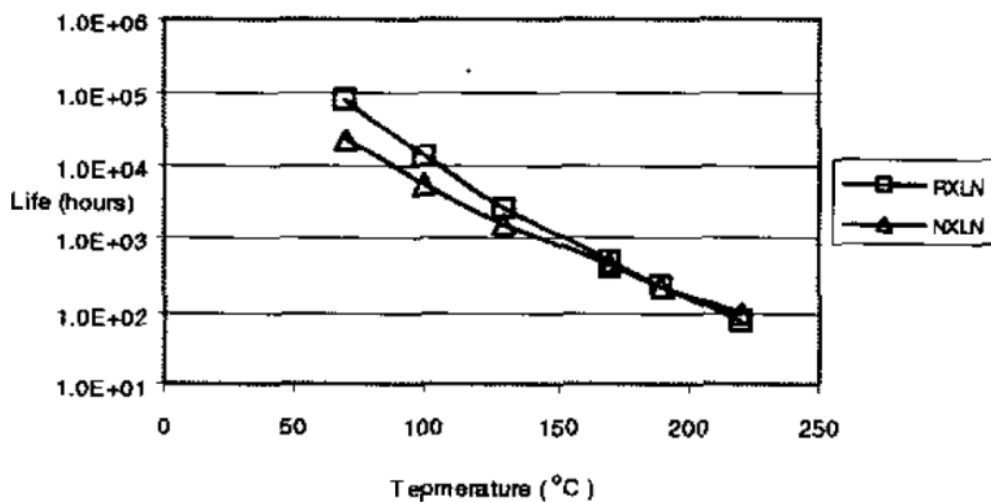
$$L = L' e^{\left(\frac{B}{T}\right)} \quad (4)$$

Der  $B$  er  $W/K$  og  $L'$  er en materialkonstant.  $L$  blir representert i forhold til det absolutte nullpunktet. Formelen over endres slik at forholdet mellom romtemperatur og prøveobjektets temperatur tas i betraktning:

$$L = L' e^{\left(\frac{B}{T_0}\right)} e^{(-BcT)} \quad (5)$$

Der  $T_0$  er den absolutte romtemperaturen og  $cT = \frac{T-T_0}{TT_0}$ , er termisk stress.

Ved å ta i bruk denne formelen har forholdet mellom temperatur og levetid blitt funnet og visuelt fremstilt slik figuren under viser [16].



Figur 2.11: Aldring av PEX-kabel. Levetiden minker ved høyere temperaturer [16]

Som figuren over, ble det vist at levetiden minker ved høyere temperaturer. Dette er noe som antas videre i denne oppgaven.

## 2.10 Elektrisk felt

En annen faktor som er viktig for veksten av vanntrær er størrelsen på det elektriske feltet. Det elektriske feltet i en koaksialkabel genereres av den påtrykte spenningen, og kan beregnes ved å ta i bruk formelen under [9][17][2].

$$E(r) = \frac{U}{r \ln \frac{r_y}{r_i}} \left[ \frac{kV}{mm} \right] \quad (6)$$

Der U er påtrykt spenning, r er radien i et gitt punkt,  $r_y$  er radiusen ved ytre halvleder og  $r_i$  er radien ved lederens overflate. For å beregne den gjennomsnittlige elektriske feltstyrken over isolasjonen brukes denne formelen:

$$E_{gjennomsnitt} = \frac{U}{r_y - r_i} \left[ \frac{kV}{mm} \right] \quad (7)$$

Selv om den påtrykte spenningen i denne oppgaven ikke endres over tid, er det likevel viktig å forstå hvordan det elektriske feltet virker.

## 2.11 Diffundering av vann i polymerer

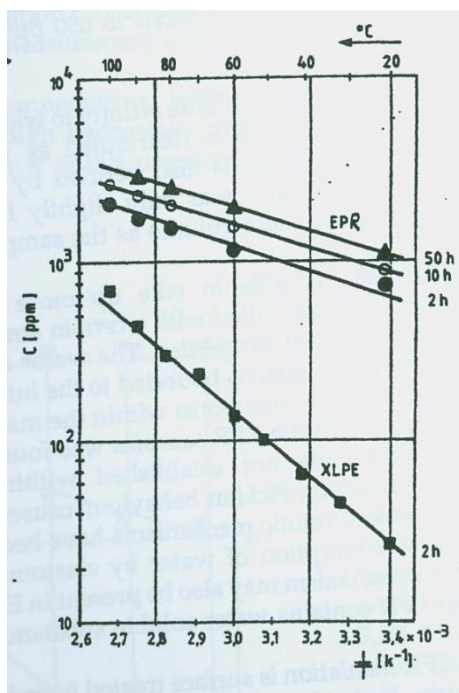
En siste faktor av interesse er isolasjonens evne til å ta opp vann. Opptaket av vann kalles diffusjon, og er mulig siden polymerene i isolasjonen består av organiske materialer, der avstanden mellom molekylene i materialet er større enn vannmolekylene. Da mengden vann i isolasjonen påvirker vannveksten, er det naturlig å se på diffusjon som en kritisk faktor ved vannvekst.

I isolasjonen finner vi tre tilstander av vann [2][14]:

1. Som oppløst vann, hvor vannmolekylene befinner seg mellom polymerkjedene uten å reagere med hverandre eller med polymerkjedene.
2. Som bundet vann, hvor vannmolekylene bindes til polymerkjedene ved dipolkrefter.
3. Som vann i form av vandrdåper.

Alle disse tilstandene av vann kan bidra til en hurtigere nedbrytning av prøveobjektene.

Det har tidligere blitt funnet at når en kabel utsettes for økende temperaturer, øker også kabelens opptak av vann. Forholdet mellom vannopptak og temperatur er vist i figuren under.



Figur 2.12: Absorbering av vann i forhold til den inverse av temperaturen [1]

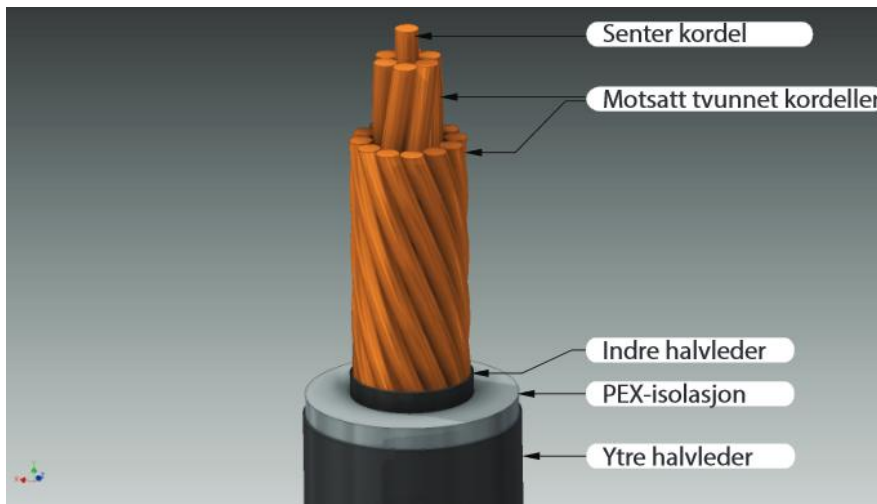
Dette forholdet er av stor interesse i denne oppgaven, da både temperatur og absorbering av vann er essensielle for veksten av vanntreer.

## 3 Metodikk

### 3.1 Kablenes utgangspunkt

Da det i dette prosjektet er av interesse å undersøke i hvor stor grad temperaturer og mekaniske spenninger påvirker dannelsen av vanntrær, må det lages spesielle prøveobjekter. Utgangspunktet for prøveobjektene er en 12 kV trippelkstrudert kabel, med en isolasjon bestående av kryssbundet polyetylen. Denne typen kabler blir kalt PEX-kabler og har tidligere blitt benyttet i vanntreanalyser [2][8].

Den 12 kV trippelkstruderte PEX-kabelen består av en leder, indre halvleder, PEX-isolasjon og en ytre halvleder. Lederen er av typen kompakt rund med til sammen 19 kordeler av kobber, med en kordel i senter med to lag kordeler tvunnet rundt i ulike retninger. Figuren under viser de ulike delene av kabelen [2]:



Figur 3.1: Illustrasjon som viser kabelens oppbygning og lag [2]

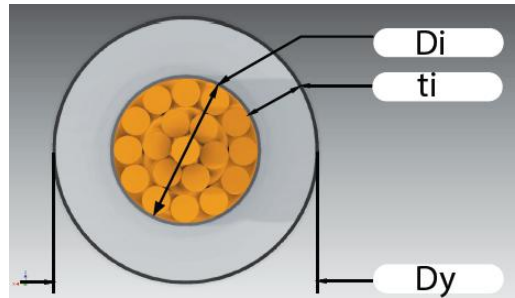
Utenpå det ytterste laget av kordeler blir det ekstrudert et lag med indre halvleder. Denne halvlederen består av et plastmateriale som er forurenset med sotpartikler for å øke konduktiviteten. Den indre halvlederen har i oppgave å skape en jevn og myk overgang mellom ledere og isolasjonen, og skal påføres på en slik måte at minst mulig forurensing eller luft oppstår i grenseflaten. Dette først og fremst for å unngå partielle utladninger i isolasjonen og for å unngå lokale forsterkninger i det elektriske feltet [1]. Deretter kommer PEX-isolasjonen som skal isolere den strømførende ledere fra omgivelsene. Til slutt kommer den ytre halvlederen som består av det samme materialet som den indre halvlederen. Denne halvlederen har i oppgave å skape en jevn og beskyttende overflate mellom isolasjonen og omgivelsene rundt kabelen, samt å sikre at den ytre halvlederen har jordingspotensial.

## 3.2 Kabelens dimensjoner

Til dette prosjektet ble det benyttet ni kabelsegmenter av typen 12kV PEX-kabel. Hvert av disse kabelsegmentene ble kuttet på ca. 3 m hver. Denne lengden ble valgt da denne lengden gir mulighet til små endringer ved behov samtidig som at kabelen ikke blir for vanskelig å arbeide med eller tar for masse plass i testriggen. Lederen i hver av kablene har en diameter på 11.4 mm, noe som gir isolasjonen en indre diameter,  $D_i$ , på 11.4 mm. Tykkelsen på selve isolasjonen,  $t_i$ , er på 4,7 mm, noe som gir en ytre diameter,  $D_y$ , på 20.8 mm. Figuren under viser noen av kabelens fysiske mål [2]:

Kabelens fysiske mål:

- Indre diameter,  $D_i = 11.4$  mm
- Ytre diameter,  $D_y = 20.8$  mm
- Isolasjonstykkelsen,  $t_i = 4.7$  mm



Figur 3.2: Tverrsnitt av kabelen [2]

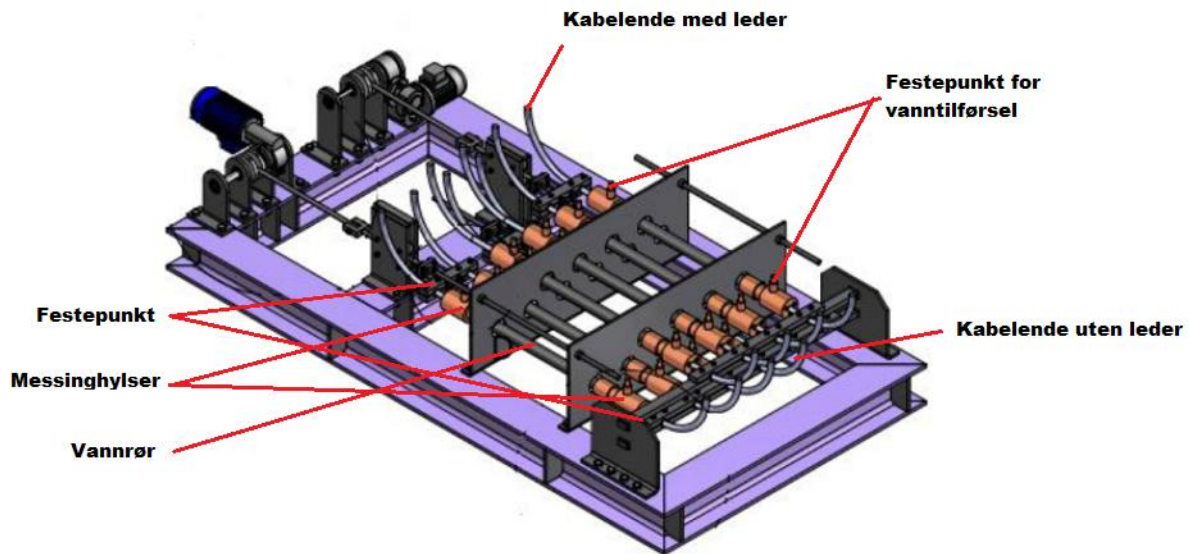
## 3.3 Tre ulike typer prøveobjekter

Tidligere oppgaver har testet ut vanntrevekst i både mekanisk stressede kabler [2] og i termisk stressede kabler [8], hver for seg. Det blir derfor undersøkt hvordan temperaturendringer virker inn på kabler under ulike mekaniske forhold. Det er her valgt å undersøke tre ulike typer prøveobjekter; kabel uten leder som strekkes 1-2 % statisk, kabel uten leder som ikke strekkes og kabel med leder som ikke strekkes. Kablene som ikke inneholder leder har den fordelen at vann kan føres direkte inn i den tomme ledergangen og tilføre isolasjonen mer vann. Kabelen som fremdeles beholder lederen blir undersøkt som en referansekabel. Hvert av disse prøveobjektene blir testet ved tre ulike temperaturer: 18 °C, 40 °C og 60 °C. Til sammen blir det dermed tatt i bruk ni prøveobjekter.

## 3.4 Testrigg

For å gjennomføre disse testene blir det tatt i bruk en testrigg som kan påføre forskjellige mekaniske spenninger. Testriggen består i hovedsak av en stålramme med festepunkter i to ender. Festepunktene i den ene enden står fast, mens festepunktene i den andre enden kan beveges av to motorer. Da det i tidligere oppgaver har blitt vist at dynamiske krefter ikke gir betydelige endringer i vanntrevekst i forhold til ustrekke kabler [2], benyttes det i denne oppgaven kun statiske strekkrefter. Dette gjøres ved å bruke en av motorfestene som en tvinne og strekke festepunktene fra hverandre så langt det er ønskelig. I dette tilfellet vil da testriggen fungere som en strekke for prøveobjektene

som skal strekkes og som et stativ for de prøveobjektene som ikke skal strekkes. Figuren under viser hvordan prøveobjektene kan festes til testtriggen [2]:



Figur 3.3: Illustrasjon som viser oppsettet av testtriggen med prøveobjekt [2]

Bakerst på illustrasjonen ser man de to motorene som i denne oppgaven ikke tas i bruk. Festepunktet lengst bak trekkes mot motorene ved å skru det bakerste festepunktet mot motoren som en tvinne. I denne illustrasjonen er det også tegnet inn vannrør. Det er gjennom disse vannrørene at vann tilføres den ytre halvlederen. Hvert enkelt prøveobjekt blir plassert i testtriggen og spenningssettes i tre uker.

## 3.5 Fremstilling av prøveobjekter

Som nevnt tidligere skal det til sammen lages ni prøveobjekter i dette prosjektet, alle med utgangspunkt i en tre meter lang 12 kV PEX-kabel. Det blir laget tre kabler for hver av de tre ulike typene mekanisk stress som skal utsettes for tre ulike temperaturer. Denne oppgaven krevde mye tid i startfasen av prosjektet.

### 3.5.1 Prøveobjekter uten leder

To av typene prøveobjekt fremstilles på samme måte, men utsettes for ulikt stress i testfasen. Disse to typene er: Prøveobjekt uten leder som ikke utsettes for strekkrefter og prøveobjekt uten leder som utsettes for 2 % strekk. Samlet betegnes de som: Prøveobjekt uten leder.

### *Merking av prøveobjektene*

Det første som gjøres med disse prøveobjektene er å merke de tre første halvmeterne i den ene enden av kablene med en blå markeringsteip. Denne teipen benyttes til å måle hvor mye kablene krymper ved å måle avstanden mellom punktene etter at lederen er blitt fjernet.

### *Uttrekking av kablen*

Det er ønskelig å utsette prøveobjektene for så mye fuktighet som mulig, da dette fremprovoserer treveksten i isolasjonen. En metode å tilføre fuktighet er å føre vann direkte inn i lederen. Det blir derfor i noen av prøveobjektene fjernet deler av lederen, slik at ledergangen blir tom, slik at vannet kan tilføres enklere. I hver kabel skal det, etter at lederen er fjernet, være omtrent en meter med leder og tre meter uten leder. Da isolasjonen krymper når lederen fjernes varierer dette tallet litt.

Prosessen med å trekke ut deler av lederen i en tre meter lang kabel med tripplekstrudert isolasjon er kraftkrevende da friksjonen mellom lederen og den indre halvlederen er stor. Før lederen fjernes må derfor denne friksjonen reduseres for å hindre ødeleggelse av kabelens isolasjon. En enkel metode for å redusere friksjonen er å fylle ledergangen med silikonolje. For å gjøre prosessen med å fylle ledergangen med silikonolje enklere ble først 10 cm av isolasjonen, med halvledere, fjernet med en kabelskreller (vedlegg E) og kordelene ble delvis separerte fra hverandre. Deretter ble et plastrør plassert utenpå den blottede lederen og silikonolje ble fylt på med hjelp av en trakt. Til slutt ble kablene hengt opp i tre timer slik at silikonoljen renner gjennom og smører inn hele ledergangen. Figurene nedenfor viser hvordan den ene enden av kablene får tilført silikonolje før de henges opp.



Figur 3.4: (V) Plastrøret plassert på kablen, (H) Kablene hengt opp til gjennomstrømning [8]



Etter at friksjonen er redusert kan prosessen med å trekke ut deler av lederen komme i gang. Selv med redusert friksjon er det behov for store krefter som virker i motsatte retninger. En kraft må holde igjen isolasjonen mens en annen kraft må trekke lederen i motsatt retning. I tidligere oppgaver har det blitt benyttet en gaffeltruck og en heisekran for å fremstille disse kreftene [2][8]. Her vil da gaffeltruckens vekt holde igjen isolasjonen mens kranen trekker i lederen. For å utføre denne prosessen må det først lages festepunkter der de to kreftene kan virke. Først tres en tynn metallskive med radius rundt 12 mm på den blottede lederen etterfulgt av en tykk metallskive med hull i midten. Den tynne metallskiven benyttes for å holde igjen så mye av isolasjonen som mulig, og må derfor ha en radius tilnærmet likt isolasjonens indre radius på 11.4 mm. Den tykke metallskiven benyttes for lettere å feste isolasjonen til gaffeltrucken ved hjelp av en stroppe. Festepunktet for lederen lages ved å skru sammen to metallskiver med spor direkte på lederen. Sporene i de to platene har til sammen en radius i underkant av lederens ytre radius. De to metallplaten kan lett kobles til kranen med en stroppe. Figuren under viser festemetode, gaffeltrucken og kranen.



Figur 3.5: Isolasjonen holdes tilbake av trucken mens lederen dras ut av kranen

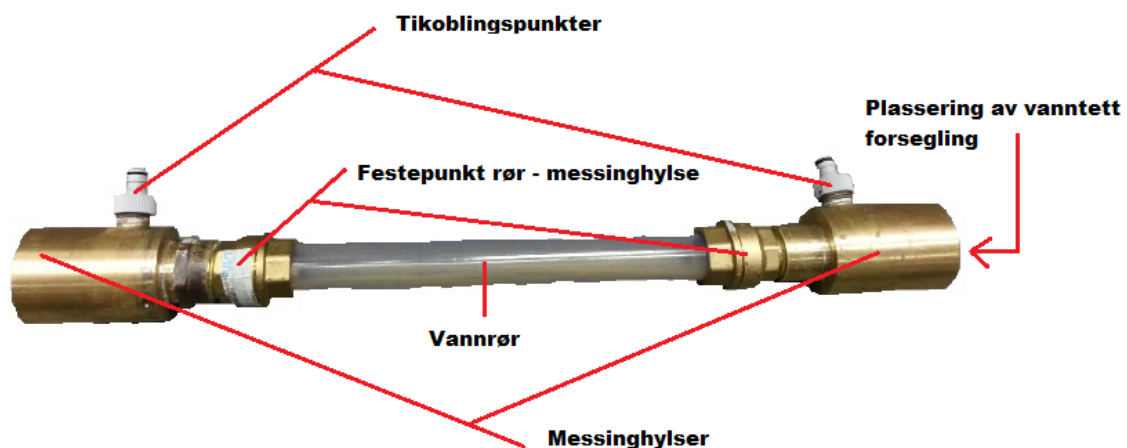
Når festepunktene er festet heves kranen. Samtidig som kranen heises opp starter deler av lederen som er nærmest festepunktene å slippe taket fra isolasjonen. For at lederen lettere skal slippe taket blir kabelen manuelt bøyd i forskjellige retninger. Til slutt vil lederen i hele sin lengde ha sluppet taket, og lederen kan trekkes igjennom hele isolasjonen. Da det er ønskelig å beholde lederen i den ene enden av prøveobjektet, blir et tynt plastrør på to meter ført inn i den tomme ledergangen. Dette plastrøret måler hvor lang den tomme ledergangen er. Denne avstanden sammenfaller ikke helt med lengden av leder som er trukket ut, da isolasjonen uten leder krymper. Dette fører til at den fjernede lederen blir mer en to meter, samt at delen med leder blir litt i underkant av en meter. Når hele plastrørets lengde får plass i ledergangen stoppes prosessen med å trekke ut lederen. Til slutt blir den overflødig lederen, med unntak av 30 cm, fjernet.

## Måling av krympelengde

Etter at lederen er fjernet blir avstanden mellom markeringsteipen målt, slik at det blir mulig å beregne hvor mye kablene har krympet under prosessen med å fjerne lederen.

## Festepunkter og vannrør

I tillegg til at det føres vann inn i den tomme ledergangen tilføres det også vann på utsiden av den ytre halvlederen. Dette vannet tilføres ved hjelp av et vannrør (vedlegg E) med indre diameter på 33 mm som plasseres utenpå kabelen. Da det er dette vannet som bestemmer temperaturen kabelen utsettes for, er det viktig å ha et vannrør med stor indre diameter slik at vannet kan sirkulere på en effektiv måte. Vannrøret består av en lang plasticsylinder som tres inn på to messinghylser, en i hver ende. I hver hylse finnes et koblingspunkt der plastslanger kan kobles på for å sirkulere vannet. Det er også en vanntett forsegling i hver ende som forhindrer vannlekkasjer. Disse vanntette forseglingene ligger på innsiden av hylsen og har en variabel ytre og indre diameter. Forseglingen består av en gummiring mellom to metallringer. Metallringene kan skrues sammen, noe som presser på gummiringen, og slik utvide gummiene både innover og utover i radiell retning. I vanlig tilstand er den ytre diameteren av gummiene mindre enn hylsens indre diameter, og den indre diameteren større enn isolasjonens ytre diameter, men straks den presses sammen vil gummiene presses mot hylsen og kabelen og på denne måten skape en vanntett forsegling.

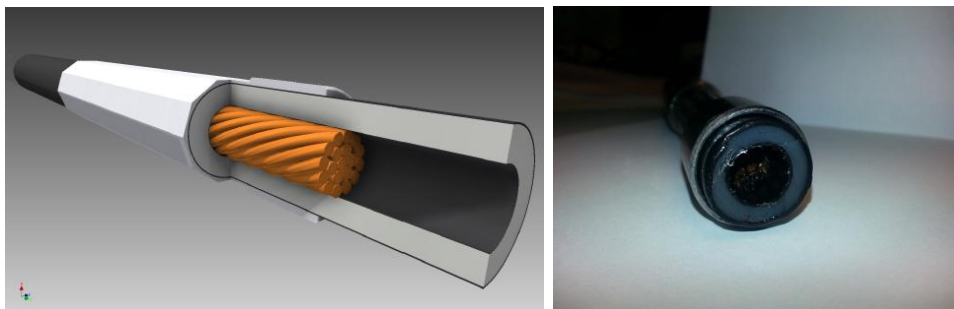


Figur 3.6: Oppbyggingen av vannrøret med messinghylsene [8]



Figur 3.7: Vanntett forsegling, to metallskiver med gummipakning mellom [2]

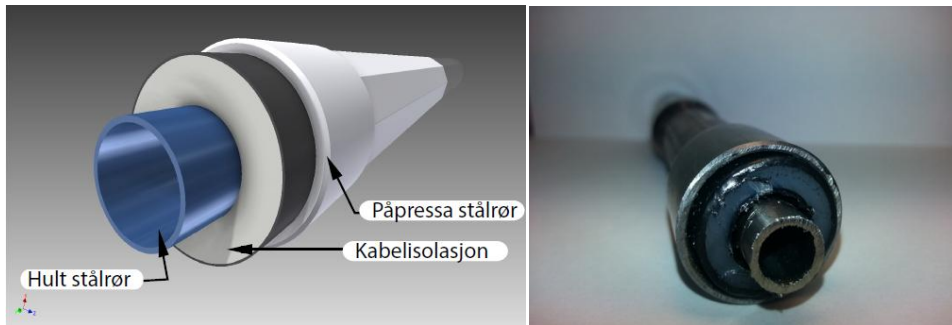
Før dette vannrøret kan plasseres på kablen må det først lages et festepunkt i den ene enden av prøveobjektet. Årsaken til å lage festepunkter på kablene er at det skal bli lettere å feste prøveobjektet til testtriggen, og strekke de prøveobjekter som krever strekk. Festepunktene fremstilles ved å presse ti cm lange stålrør (vedlegg E) med en indre diameter på 22 mm ned på isolasjonen. Utstyret som tas i bruk i denne prosessen er en kabelpresse (vedlegg E) med en indre diameter som kan justeres etter behov. Maskinen har flere hoder med forskjellig diameter som enkelt kan skiftes ut. I denne oppgaven ble et hode med 19 mm benyttet. For hvert hode kan dimensjonen justeres opp slik at kabelpressen ikke presser helt ned til sin minimale diameter. I prosjektet ble diameteren justert opp, til 21 mm, før festepunktet ble presset ned på kablene. For at isolasjonen ikke skal ta skade av denne kompresjonen må det finnes en hard kjerne på innsiden av isolasjonen. Det første festepunktet lages enkelt ved å presse røret ned på enden av lederen i overgangen mellom tom ledergang og leder. Det er her viktig å plassere det ti cm lange stålrøret slik at hele røret treffer en hard kjerne. For å være på den sikre siden, plasseres røret slik at det blir et overlapp på noen centimeter.



Figur 3.8: Illustrasjon av festepunktet med lederkjerne [2] med bilde av det faktiske festepunktet [8]

Etter at det første festepunktet er laget, føres vannrøret inn på kablen og plasseres på den delen av kablen som mangler leder. Til slutt må nok et festepunkt lages, en meter ifra det første festepunktet. Denne typen festepunkt er mer problematiske da det ikke finnes leder i denne delen av kablen. Dette problemet løses ved å føre ett 15 cm langt stålrør (vedlegg E) med ytre diameter på 10 mm inn i den tomme ledergangen. Først blir avstanden fra den ene kabelenden inn til overgangen mellom leder og tom ledergang nøyaktig målt med et tynt stålrør. Deretter trekkes en meter ifra denne lengden og den nye lengden markeres på stålrøret. Deretter føres det lille stålrøret inn i den

tomme ledergangen ved å dytte det lange stålrøret helt til det markerte området. Slik blir avstanden mellom festepunktene kjerner akkurat en meter. Til slutt presses det tykke stålrøret ned på kabelen en meter ifra det andre festepunktet. Da det tynne røret er fem cm lengre enn det tykke røret, vil de bli et overlapp på omtrent 2.5 cm på hver side av festepunktet. Dette er viktig siden det da ikke blir noe skade på isolasjonen. Med disse festepunktene ferdig fremstilt kan kabelen enkelt festes til testtriggen.



Figur 3.9: Illustrasjon av festepunktet med stålrør [2] med bilde av det faktiske festepunktet [8]

### Endeavslutninger

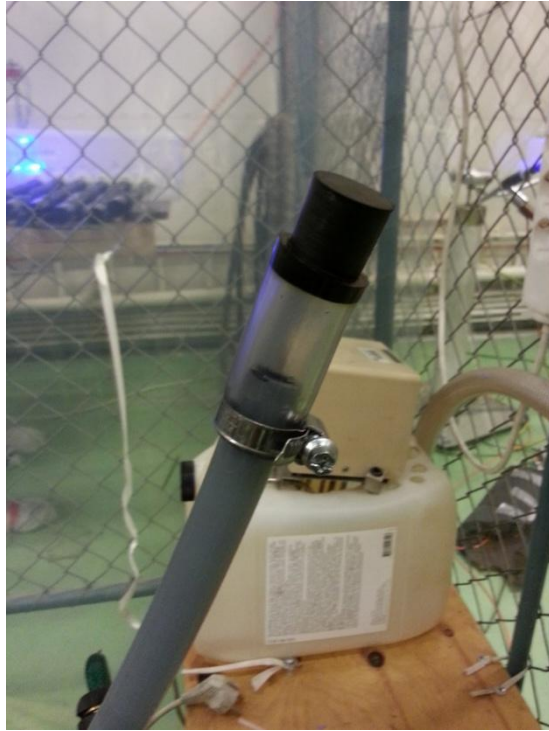
Etter at lederen er fjernet, festepunktene er festet og vannrøret er plassert blir hver ende av kabelen klargjort til å lage endeavslutninger. Igjen blir kabelskrelleren benyttet til å fjerne deler av isolasjonen. I hver ende av kabelen blir 30 cm av den ytre halvlederen fjernet slik at isolasjonen blottlegges. Det er her viktig å rotere skrelleren med en jevn fart for å unngå kuler og uregelmessigheter på isolasjonsoverflaten. Det er også viktig at overgangen mellom isolasjonen og halvlederen blir så jevn og rett som mulig. Dersom den ikke blir helt rett må det benyttes en halvledende lakk, av typen Raychem EPPA 220, i overgangen. Denne lakken påføres ved å markere det området som ikke skal lakk med teip, og deretter påføre lakken i flere lag. Til slutt fjernes teipen slik at overgangen blir helt rett. Deretter markeres det med tusj 3.5 cm inn på halvlederen. Når 30 cm av halvlederen er fjernet og overgangen mellom isolasjon og halvleder er rett, smøres den blottede isolasjonen inn med en silikonpaste av typen Molykote 111 compound. Deretter tres en stresskone helt inn til merket ved 3.5 cm. Merket fungerer slik at når konen ligger over dette merket så er det kontakt mellom den halvledende elektroden i konen og kabelens halvleder. Silikonpasten som ble påført gjør det lettere å tre konen på kabelen samt hindrer at det oppstår luftbobler i kontaktflaten mellom konen og isolasjonen. Stresskone i seg selv består av en halvledende elektrode omgitt av et isolerende materiale. Den halvledende elektroden er formet slik at det elektriske feltet fordeler seg bedre i endeavslutningen og hindrer at det oppstår elektriske overslag (vedlegg E).



Figur 3.10: (V) Stresskone og silikonpaste, (H) Stresskone plassert på en av kabelendene [8]

### *Sluttdetaljer*

Før prøveobjektene er klare til å plasseres i testriggen gjenstår det noen enkle sluttdetaljer. Først blir en jordingsstreng, en tynn tråd av et ledende materiale, surret rundt hele lengden av kabelen, inkludert utenpå vannrøret og festepunktene. Denne strengen festes i hver ende av kabelen med teip. Deretter blir det i hver ende av kabelen plassert en kort plastslange, som skal benyttes til å kontrollere vannnivået i de tomme ledergangene. I enden med leder plasseres slangen utenpå overgangen mellom isolasjonen og den blottede lederen. Slangen dekker da store deler av den blottede lederen slik at vannnivået kan måles i denne enden. I den andre enden blir et annet plastrør plassert i enden av den blottede isolasjonen. Det er i denne enden at vannet tilføres den tomme ledergangen. Vannet vil da kunne måles i plastrøret. Hver av plastslangene festes med hver sin rørklemme. Det er viktig at potensialet ved hver rørklemme er lik potensialet til vannet, og det blir derfor plassert en tynn tråd fra lederklemmen og inn i den tomme ledergangen. For å hindre fordamping av vann blir plastslangen ved den tomme ledergangen lukket med en gummipropp.



Figur 3.11: Plastrør festet med rørklemme i enden av den blottede ledergangen [8]



Figur 3.12: Et ferdiglaget prøveobjekt uten leder klar for installasjon

### 3.5.2 Prøveobjekter med leder

Disse prøveobjektene, som ikke gjennomgår prosessen med å fjerne deler av lederen, krever mye mindre arbeid.

#### *Forarbeid*

Først blir deler av isolasjonen fjernet med en kabelskreller, 20 cm i den enden som kobles til transformatoren og fem cm i den andre enden.

#### *Festepunkter og vannrør*

Da disse prøveobjektene ikke skal utsettes for statiske strekkrefter under testperioden, er det heller ikke behov for å fremstille festepunkter. Dermed kan vannrøret enkelt tres inn på kabelen og føres til det området der det er ønskelig å tilføre vann.

#### *Endeavslutninger og sluttdetaljer*

Produksjonen av endeavslutninger og sluttdetaljer foregår på samme måte som for de andre prøveobjektene med unntak av at det i den enden som ikke kobles til transformatoren benyttes en plastslange som er lengre enn de fem centimeterne med blottet leder. Dette er viktig siden det da blir mulig å lukke denne enden med en propp og slik forhindre at vannet fordamper.



Figur 3.13: Et ferdiglaget prøveobjekt med leder klar for installasjon

### 3.6 Oppkobling av vannsystemet

I dette prosjektet ble hver type prøveobjekt testet ved tre ulike temperaturer, hvor hver temperatur krevde en gjennomkjøring på tre uker. For hver gjennomkjøring ble kablene koblet opp på den samme måten. Vannsystemet i seg selv består av en vanntank, et varmeelement, en vannpumpe, vannrørene på hvert prøveobjekt og en rekke plastslanger som fører vann til og fra objektene via vannrørene. Det er veldig viktig at temperaturene holdekonstant, da store variasjoner i temperaturer kan resultere i overmetning av vanninnhold i isolasjonen, noe som kan virke inn på resultatene. Dette er spesielt viktig ved høye temperaturer, da temperaturene her lettere endrer seg i et større område.

#### 3.6.1 Vanntanken

Vanntanken består av en ti liter stor plastkanne som er støttet opp av en treramme. Trerammen er viktig da plasten i seg selv blir veldig myk ved de høyeste temperaturene, og kan kollapse. I plastkannen finner vi et stort rektangulært hull, et stort og fire små sirkulære hull. Det rektangulære hullet er laget slik at varmeelementet som skal varme opp vannet kan plasseres nedi vannet. Det største hullet er plassert slik at en tykk vannslange som kommer fra vannpumpen lett kan føres ned i tanken. Tre av de fire små hullene benyttes til å lede vannslanger fra hvert prøveobjekt tilbake til tanken slik at vannet er i konstant sirkulasjon, mens det siste røret benyttes til å føre vann i en



vannslange fra utsiden av cellen til tanken. Det er gjort slik for å unngå at prosjektet stoppes hver gang vann må etterfylles. Dette gir bedre resultater, da spenningen kan påtrykkes kontinuerlig. Det er også viktig å ha muligheten til å etterfylle vann på vanntanken da det vil foregå en del fordamping av vannet mellom høye vanntemperaturer og lave romtemperaturer.

### 3.6.2 Varmeelementet

Varmeelementet består i hovedsak av en metallspiral som plasseres ned i vanntanken, en indre varmesensor, en flottør for å kontrollere vannmengden, en liten sirkulasjonspumpe og selve kontrollpanelet som plasseres på toppen av vanntanken. Den indre sensoren er der for å sikre at temperaturen rundt varmeelementet ikke blir for høyt, mens flottøren sender signaler om å stoppe oppvarmingen dersom vannivået synker til et visst nivå. Dette er innebygde funksjoner for å fremme sikkerheten ved bruk av et slikt varmeelement. Den lille sirkulasjonspumpen ligger i vannoverflaten og ser til at vannet nede i tanken sirkuleres slik at alt vann får tilført varme. Denne funksjonen er et tillegg til den naturlige sirkulasjonen som oppstår av det sirkulerende vannet, og er mer til nytte i tanker som ikke har egen sirkulasjon. Til slutt finner vi releet på toppen av vanntanken, der temperaturen kan stilles inn ved å justere på de ulike bryterne (vedlegg E). Da det er temperaturavhengighet som er i hovedfokus i denne oppgaven, anses varmeelementet som en av de viktigste komponentene.

### 3.6.3 Vannpumpe

Vannpumpen (vedlegg E) er selve drivkraften i hele vannsirkulasjonen, og veldig viktig for å tilføre kablene korrekt temperatur. På output siden av vannpumpen finner vi en kobberfordeling som fungerer på den måten at vannvolumet som kommer inn kan fordeles på til sammen seks mindre koblingspunkter. Det er mulig å bestemme hvor mange av koblingspunktene som skal være åpne ved å skru på noen små skruer på hvert punkt. På denne måten er det mulig å bestemme hvor mange prøveobjekter som skal tilføres vann eller ikke. I denne oppgaven ble alltid de tre typene prøveobjekt benyttet, så fordelingen måtte fordele vannet på disse tre kablene. I tillegg ble det benyttet en ekstra slange som går direkte til en bøtte for å ha muligheten til hurtig å tømme vannet ut av oppsettet. På input siden av pumpen finner vi et stort plastrør som går ned i vanntanken, og som forsyner pumpen med den nødvendige vannmengden. Oppå vannpumpen finnes det en bryter som kan variere mellom to pumpehastigheter. I denne oppgaven var pumpen alltid stilt inn på den raskeste hastigheten. Denne hastigheten ble valgt for å sikre så rask sirkulasjon som mulig slik at tap av varme reduseres.

### 3.6.4 Isolering av vannrørene og plassering av temperatursensorer

For å sikre så jevn temperatur som mulig over hele prøveobjektet, blir hvert vannrør isolert med armaflex. Armaflex er en veldig god termisk isolator, og hjelper til med å holde en jevn temperatur på overflaten av vannrøret. Før armaflexen kan plasseres, må det festes en temperatursensor direkte på hvert vannrør. Disse sensorene skal benyttes til å føre konstante målinger av temperaturen og

overføre disse til en datalogger på en pc (vedlegg E). Slik kan temperaturendringer senere undersøkes og fremstilles grafisk dersom det blir behov for dette. Sensorene ble enkelt festet til midten av vannrørene ved å ta i bruk teip og små elektriker strips.



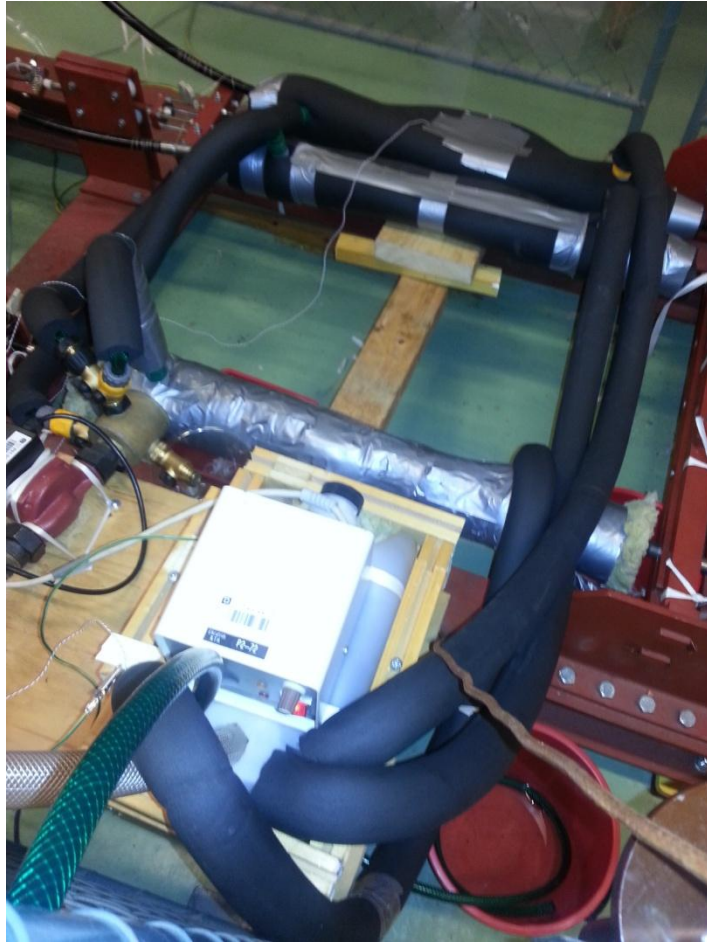
Figur 3.14: Sensor festet på ett vannrør med elektriker strips

Etter at temperatursensorene var plassert og koblet til dataloggeren, isoleres vannrørene. Da armaflexen kommer i form av rør med forskjellige dimensjoner, var det enkelt å klippe den i rette lengder og tre den inn på kabelen slik at den dekker hele vannrøret. Det ble deretter skjært ut to hull i isolasjonen der vannet skal tilføres vannrøret. Helt til slutt ble endene og hullene teipet sammen slik at minst mulig varme overføres til omgivelsene.

### 3.6.5 Plastslinger

For å føre vann til og fra vannrørene ble det benyttet vanlige plastslinger av forskjellige lengder. Slangene som fører vannet til rørene ble klippet opp i lengder som tilsvarer avstanden mellom koblingspunktene ved vannrør til koblingspunktene ved vannpumpen, mens slangene som fører vannet bort ble klippet opp i lengder som tilsvarer avstanden mellom koblingspunktene ved vannrøret til vanntanken, pluss 10 cm som kan føres ned i vanntanken.

For å redusere varmetapet i overføringen ble også disse plastslangene isolert med armaflex. Her ble først armaflexen klippet opp i de samme lengdene som slangene, og deretter tredd inn på slangene. Etter at armaflexen var plassert ble det skrudd på koblingssystem på hver ende, og slangene ble koblet til vannrørene, vannpumpen og ført ned i tanken. Figuren under viser hvordan hele systemet ble koblet sammen.



Figur 3.15: Oppkoblingen av vanntilførselssystemet

## 3.7 Oppkobling av det elektriske

Samtidig som kablene ble tilført fuktighet, ble de også spenningsatt via et elektrisk system. Det er essensielt å tilføre spenning i denne oppgaven siden initieringen av vantrær kun starter dersom isolasjonen opplever både fuktighet og et alternerende elektrisk felt. Det elektriske systemet består av en varierende spenningskilde (variac), ledninger, en transformator, en samleskinne, koronaringer og jordingsledninger.

### 3.7.1 Variacen

Variacen, eller den varierende spenningskilden, er den delen av det elektriske systemet som tilfører spenningen. Den kan tilføre systemet en 50 Hz vekselspenning helt opp til 220 V. Ved å bruke kontrollpanelet på fremsiden av variacen og et voltmeter som er koblet inn på baksiden, kan den påtrykte spenningen varieres (vedlegg E). Spenningen stilles inn på ønsket verdi ved å bruke panelet samtidig som spenningen kontrolleres med et voltmeter. Det finnes også en skrue fremme på

panelet der maksimal strøm kan stilles inn. Denne skruen er viktig siden innstillingen av denne knappen gjør at spenningskilden skrur seg av dersom en feil oppstår i det lokale strømnettet.

Dersom det skulle oppstå en farlig situasjon, eller at det oppstår en feil som ikke slår ut variacen, benyttes Kontaktor ut 1 som nødstop.

### 3.7.2 Transformatoren og samleskinnen

Det er ønskelig i denne oppgaven å utsette kablene for en spenning på omtrent 13 kV, men siden variacen har en maksimalverdi på 220 V er det behov for en transformator (vedlegg E). Det antas at i denne oppgaven at forholdet mellom transformatorens primærside og sekundærside er konstant, og at verdier fra tidligere oppgaver kan benyttes for å stille inn variacen [8]. I den forrige oppgaven fikk man med transformatorforholdet en spenning,  $U$ , på 13.09 kV dersom man stilte variacen på 28.6 V. Med antagelsen over ble variacen også i denne oppgaven stilt inn på 28.6 V. Spenningen ut fra sekundærsiden av transformatoren ble derfor på 13,09 kV. Denne spenningen blir ført videre til prøveobjektene via en samleskinne av aluminium. De blottede lederne som ligger i motorenden av testriggeren blir skrudd fast til samleskinnen ved å ta i bruk rørklemmer av metall. Slik får alle prøveobjektene påtrykt den samme spenningen på 13,09 kV.

Ved denne spenningen dannes det et elektrisk felt med en maksimal feltstyrke,  $E_{\max}$ , på 3,8 kV/mm ved den indre halvlederen og en minimal feltstyrke,  $E_{\min}$ , på 2,1 kV/mm ved den ytre halvlederen. Samlet blir det gjennomsnittlige elektriske feltet,  $E_{\text{gjennomsnitt}}$ , på 2,79 kV/mm. Beregningen av disse tallene finnes i vedlegg B.

### 3.7.3 Koronaringer og jordingsledninger

Dersom deler av det elektriske systemet består av skarpe kanter, kan det i disse områdene oppstå små elektriske utladninger i luften. Disse utladningene kalles korona, og oppstår når det lokale elektriske feltet rundt de skarpe kantene blir så stort at luften rundt dem ioniseres. For å unngå at slike koronaer oppstår blir det ved hver skarpe kant plassert koronaringer. Koronaringene har en geometrisk form som avrunder det elektriske feltet og hindrer at lokale feltforsterkninger oppstår. I dette prosjektet er de mest utsatte områdene å finne i overgangen mellom samleskinnen og prøveobjektene og ved rørklemmene som holder vannslangene ved hver kabelende.



Figur 3.16: (V) Avlang koronaring ved aluminiumssamleskinne, (M) Koronaringer ved endeavslutningene, (H) Koronaring

Ved overgangen mellom samleskinnen og prøveobjektene ble en stor og avlang koronaring plassert slik at alle tre koblingspunkter og samleskinnens ende ligger innenfor koronaringens areal. Ved hver rørklemme ble det plassert en sirkulær koronaring. For at både koronaringene og de skarpe kantene skal ha samme potensial, ble det laget en kobling mellom dem med en tynn ledende metalltråd. Denne tråden ble også benyttet til å holde koronaringene fast.

Helt til slutt ble jordingsstrengene på hvert prøveobjekt koblet til jord, via tykkere jordingsstrenger. Jordingsstrengene går hver for seg bort til et jordingspunkt i form av en stor gul metallvekt, som er koblet til jord. Når alt det elektriske er korrekt tilkoblet kan spenningen settes på, og stå på i tre uker for hver gjennomkjøring.

### 3.8 Vanntreanalyse

Etter at hver gjennomkjøring har stått spenningsatt og fuktig i tre uker, blir prøveobjektene tatt ut av testriggen og kuttet opp i tre deler. Prøveobjektene blir kuttet opp ved hvert festepunkt, slik at den delen av objektet som ble tilført fuktighet kommer løs fra resten av prøveobjektet. Deretter blir vannrøret fjernet og prøveobjektet er redusert til et en meter langt lederløst kablesegment.

#### 3.8.1 Oppsnitning

På midten av det korte kablesegmentet blir det kuttet ut to mindre biter av kablesegmentet. Disse bitene har en lengde på omtrent 5 cm hver, og er til sammen de delene av prøveobjektet som skal snittes opp og analyseres med mikroskop. Lederne i prøveobjektene med leder ble dyttet ut fra ledergangen ved å dytte en skrupresse mot lederen samtidig som at isolasjonen støttes mot en stålplate med hull i.

Etter at alle bitene av kabel var godt merket med type mekanisk og termisk stress, ble de fraktet til et mikrotom som skulle dele bitene opp i små snitt (vedlegg E). Her festes kabelbitene til et festepunkt som føres frem og tilbake mot et skarpt knivblad. For å stive av bitene, ble deler av det lille stålrøret puttet inn i den tomme ledergangen. Det er her viktig å passe på at stålrøret ikke kommer i kontakt med knivbladet i mikrotomet, da dette vil ødelegge knivbladet.

Først ble den ujevne flaten jevnet ut ved å føre maskinen frem og tilbake på mikrotomet samtidig som festepunktet ble hevet. Etter at overflaten var jevnet ut startet prosessen med å lage snittene. For hvert snitt ble mikrotomet først hevet 0,25 mm og deretter ført frem og tilbake. For hvert segment lages det ti snitt, så totalt ble det laget 90 snitt, alle laget på samme måte i mikrotomet.



Figur 3.17: (V) Mikrotomet, (M) en av kabeldelene festet i mikrotomet og (H) tre ferdige snitt [8]

### 3.8.2 Innfarging med metylenblått

Underveis i prosjektet har isolasjonen hele tiden blitt utsatt for et fuktig miljø, slik at det kan dannes vanntrær. Straks prøveobjektene hentes ut fra testtriggen, vil vannet i isolasjonen fordampe. Når vannet i isolasjonen fordampes, etterlater det seg små treliknende kanaler som kalles vanntrær. Disse kanalene er ikke synlige når isolasjonen er klar, slik de er i bildet over. For å synliggjøre disse kanalene og klare å detektere vanntrærne i mikroskopet må, isolasjonen og vanntrærne farges. Dette gjøres enkelt ved å dyppe hvert snitt i en blanding med metylenblått.

Når blandingen med metylenblått skal fremstilles, er det viktig å ta i bruk rene kolber. Dette gjøres for å unngå at store deler av fargestoffet skal feste seg til urenheter i kolben i stedet for på snittene. Det som trengs for å lage en blanding på omtrent 0,2 l ferdig metylenblått, er [18]:

- |   |     |    |   |              |
|---|-----|----|---|--------------|
| - | 6   | g  | metylenblått                                      | i pulverform |
| - | 0,5 | g  | Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> (natriumkarbonat) | i pulverform |
| - | 200 | ml | Springvann  | i væskeform  |

Den enkleste metoden å blande sammen innholdet, er å først fylle opp kolben med den ønskede vannmengden, som er tilnærmet lik mengden ferdig blanding, og deretter fylle på pulverene hver for seg. Det er viktig å måle nøyaktig mengde metylenblått og natriumkarbonat, og det ble derfor benyttet vekt og spatel. Det anbefales å fylle opp med så mye vann at snittene lett kan dyppes ned i kolben og helt tildekket med metylenblått.

Når alle komponentene er blandet sammen, slippes en avlang magnet ned i kolben. Denne magneten benyttes til å røre sammen blandingen med en magnetrører (vedlegg E). Magnetrøreren består av et roterende magnetfelt på en plate. Oppå denne platen plasseres kolben med den avlange magneten og når magnetfeltet under roterer, roteres også magneten. Rotasjonshastigheten til det magnetiske feltet kan varieres ved å skru på en bryter på fremsiden av apparatet. Siden blandingsprosessen krever en temperatur på 67,5 °C, plasseres både magnetrøreren og kolben i et varmeskap. Ved en temperatur på 67,5 °C vil noe av vannet fordampe og forlate kolben. For å unngå dette plasseres et lokk av aluminiumsfolie på toppen av kolben. Aluminiumsfolien er formet slik at det laveste punktet er i sentrum av lokket slik at vann som kondenserer på aluminiumet samler seg i midten av folien og drypper tilbake i blandingen.

Blandingsprosedyren er som følger [18]:

1. Glasset settes inn i varmeskapet som er satt på 67,5 °C. Magnetrøreren settes på
2. Magnetrøreren rører blandingen i 5 timer
3. Magnetrøreren slås av
4. Når magnetrøreren har vært av i minst 20 timer, slås den på igjen
5. Deretter røres blandingen i ca. 1 time
6. Til slutt stoppes røreren, og snittene kan puttes oppi blandingen
7. Innfargingstiden ved ny oppløsning er 4,5 timer ved 67,5 °C
8. Etter at snittene har ligget i oppløsningen i 4,5 timer tas begerglasset ut av skapet og snittene flyttes over i et begerglass med varmt vann.
9. Etter at snittene har ligget i vannet i ca. en time, vil fargene være godt nok fremkalt og snittene kan tas opp av vannet og tørkes
10. Snittene er nå klare for analyse

En blanding kan benyttes flere ganger, men for hver gang den benyttes, vil fargekvaliteten avta. Det er derfor viktig å merke seg hvor mange ganger en blanding er benyttet. For små volum bør blandingen røres i varmeskap ved 67,5 °C i minst en time før den benyttes på nytt [18].

For å effektivisere innfargningsprosessen, plasseres de ulike gruppene med snitt på hver sin ståltråd før de dyppes i blandingen. Ståltråden kan formes slik at kontakt mellom de ulike snittene ikke oppstår. Dette er viktig for å få samme fargekvalitet på alle snittene. Det er dermed mulig å fargelegge flere grupper med snitt samtidig.



Figur 3.18: (V) Snitt festet til en ståltråd, (M) varmeskapet med to magnetrørere og (H) vannbad med snitt oppi [8]

### 3.8.3 Mikroskopsanalyse

Etter at snittene er farget og tørket, er de klare for mikroskopsanalysen. I denne analysen benyttes et stereomikroskop som er koblet til en datamaskin (vedlegg E). Dette gjør det mulig å analysere snittene både ved hjelp av okularene og ved hjelp av et kamera som sender bilde til datamaskinen. Å analysere snittene på datamaskinen gjør arbeidet med å bestemme lengder enklere, da det er en egen målefunksjon på datamaskinen.

#### *Analyse på datamaskin*

På toppen av mikroskopet er det koblet til et kamera. Dette kameraet filmer objektene som ligger under lupen, og blir påvirket av linsene som benyttes i mikroskopet. Kameraet filmer dermed det samme som er visuelt synlig gjennom okularene. Den eneste forskjellen mellom kameraet og okularene er at okularenes synsfelt er bredere enn kameraets. Bildene som filmes av kameraet, sendes til datamaskinen, der et dataprogram bearbejder bildene.

Programmet som benyttes i analysen heter ZEN, og inneholder mange funksjoner som kan benyttes i analysen av snittene. Den viktigste funksjonen er muligheten til å måle lengden på hvert enkelt vanntre.

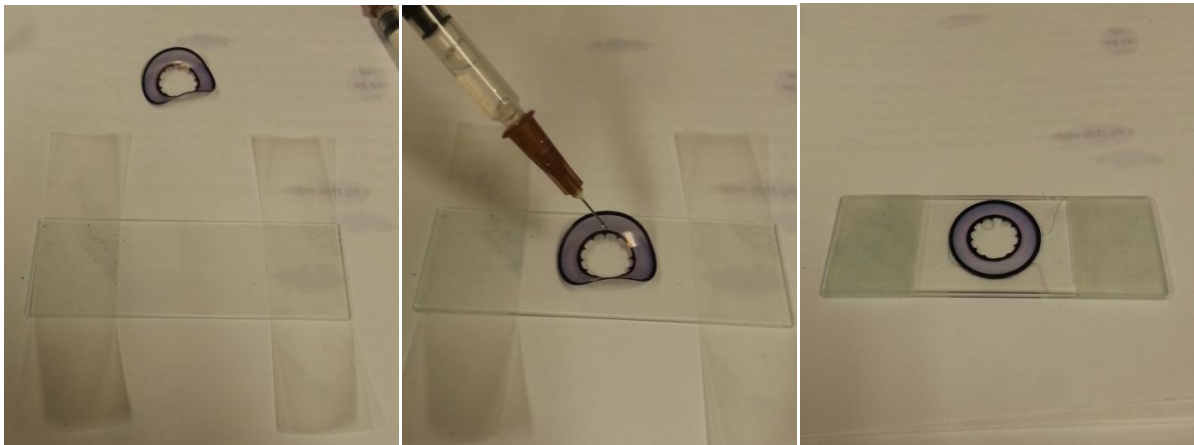
Før analysen kan begynne, må målefunksjonen kalibreres. Dette gjøres ved å legge en måleplate med et bestemt mønster under lupen. Denne måleplaten består av en rekke parallelle streker med en bestemt avstand mellom hver strek. Avstanden er kjent, og lengden som da måles i ZEN kan kalibreres mot denne avstanden. Det er viktig å huske på at dersom linsens forstørrelsesgrad endres, må også forstørrelsesgraden i ZEN endres på samme måte.



En annen funksjon som er viktig i ZEN, er muligheten til å lagre bilder, slik at det er mulig å analysere de ulike trærne i senere tilfeller, eller bare hente bildene til videre bruk.

### *Preparering av snitt til analysen*

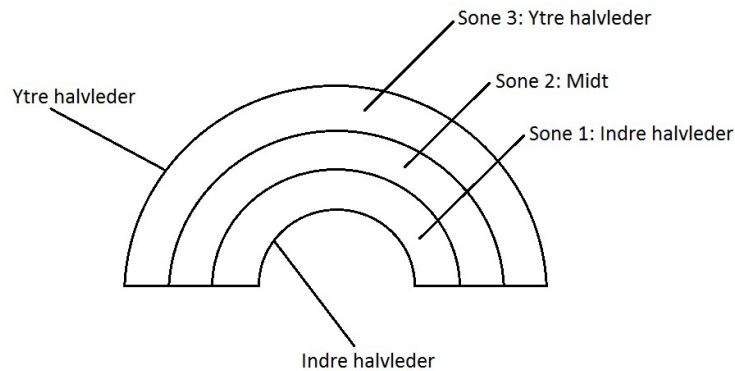
Når snittene skal analyseres, kan de ikke plasseres direkte på mikroskopet slik som de er. Dette kommer av at snittene ikke er helt flate, som gjør analysen vanskelig da høydeforskjeller blir veldig synlige i mikroskopet. Selve snittene er også veldig uklare da den kuttete overflaten ikke er helt jevn. For å stive av snittene og gjøre overflaten jevnere, må derfor snittene behandles. Først legges snittet på et dekkglass. Deretter benyttes en liten sprøyte til å dekke snittet med mikroskopolje (dimetylen phthalate). Denne oljen gir en finere overflate uten luftbobler, som gjør det lettere å analysere snittet. Til slutt presses enda et dekkglass mot det første dekkglasset slik at snittet og oljen kommer i klem mellom dem. For å unngå at dekkglassene faller fra hverandre, teipes de sammen i hver ende. De ferdige snittene merkes med nummer og gruppenavn før det legges på papir for å hindre at overflødig mikroskopolje havner på dekkglassenes overflate.



Figur 3.19: Preparering av snitt til analysen

## Hva som analyseres

Det som er av interesse i denne oppgaven, er å finne ut hvor mange vanntrær som oppstår i de ulike snittgruppene, hvor i hvert snitt de fleste trærne oppstår og i hvilke snitt trærne er lengst. Alle disse faktorene kan analyseres samtidig ved å ta i bruk målefunksjonen på ZEN, og ved å dele isolasjonen inn i tre ulike soner. De tre sonene er: Sone 1: Indre halvleder, Sone 2: Midt og Sone 3: Ytre halvleder. Figuren under viser hvordan disse sonene er delt inn.



Figur 3.20: Isolasjonens inndeling av soner [2]

Denne soneinndelingen er ikke synlig underveis i analysen, men det er valgt å følge ytre og indre halvleder med mikroskopet, og telle trær som ligger i mikroskopets synsfelt. Synsfeltets diameter er på 1 mm, som gjør at alle trær som ligger 1 mm fra halvlederne blir telt. Da det antas at de største endringene oppstår ved indre og ytre halvleder, altså sone 1 og sone 3, vil ikke antall vanntrær i sone 2 telles.

Siden radiusen ved den ytre halvlederen er større enn ved den indre halvlederen, vil ikke volumet som dekkes av mikroskopet være likt for de to sonene. Dette er viktig å ta med i beregningen når antall vanntrær skal analyseres videre og diskuteres.

Volum i de to ulike sonene beregnes slik:

$$V_{ytre} = \pi \cdot t_{snitt} \cdot (R_{ytre}^2 - (R_{ytre} - D_{syms})^2) \quad (8)$$

$$V_{indre} = \pi \cdot t_{snitt} \cdot ((R_{indre} + D_{syms})^2 - R_{indre}^2) \quad (9)$$

$$V_{totalt} = \pi \cdot t_{snitt} \cdot (R_{ytre}^2 - R_{indre}^2) \quad (10)$$

Der  $t_{snitt}$  er snittets tykkelse, som for alle snittene er på 0,25 mm,  $R_{ytre}$  er snittets ytre radius,  $D_v/2$ ,  $R_{indre}$  er snittets indre radius,  $D_i/2$  og  $D_{syms}$  er mikroskopets synsfelt. Utrengningen av volumene kan finnes i Vedlegg C.

$$V_{ytre} = \pi \cdot \frac{99}{20} = 15,5508836 \text{ mm}^3$$

$$V_{indre} = \pi \cdot \frac{31}{10} = 9,73893723 \text{ mm}^3$$

$$V_{totalt} = \pi \cdot \frac{7567}{400} = 59,431079 \text{ mm}^3$$

Det totale volumet er av interesse, da hele isolasjonens volum undersøkes for å finne det største vanntreet i hvert snitt.

Tidligere funn har vist at det oppstår svært få ventilerte vanntrær etter en aldringsprosess på kun tre uker [8]. Til tross for dette vil de ventilerte vanntrær som lokaliseres i mikroskopsanalysen, telles.

Det antas at det i denne oppgaven blir produsert mange, men små vanntrær. For å redusere arbeidsmengden blir det derfor bestemt at kun vanntrær som er i størrelsesorden 30  $\mu\text{m}$  eller større, telles. Lengden måles fra tuppen av den lengste forgreningen til tuppen av den lengste motstående forgreningen.

For hvert snitt telles antallet trær,  $n_{i,j}$ , i hver sone som benyttes til å beregne gjennomsnittlig antall vanntrær for en snittgruppe,  $n_{gjennomsnitt,j}$ :

$$n_{gjennomsnitt,j} = \frac{\sum n_{i,j}}{N}, \left[ \frac{\text{antall}}{\text{snitt}} \right] \quad (11)$$

Her er  $i$  et snittnummer mellom 1 og 10,  $j$  er typen snittgruppe og  $N$  er antall snitt. Gjennomsnittet i hver sone deles så på det tilhørende volumet, slik at de forskjellige sonene kan sammenlignes.

Ved å bruke ZEN ble det lengste vanntreet,  $l_{\max,i,j}$ , i hvert snitt målt. Disse tallene benyttes til å finne den gjennomsnittlige maksimale lengden for hver snittgruppe,  $l_{\max,gjennomsnitt,j}$ :

$$l_{\max,gjennomsnitt,j} = \frac{\sum l_{\max,i,j}}{N}, \left[ \frac{\text{mm}}{\text{snitt}} \right] \quad (12)$$

Dette tallet deles ikke på volum da hele snittets volum analyseres når det største vanntreet skal lokaliseres.

Det er videre av interesse å se om de endringer som blir gjort på de ulike parametrene vil gi signifikante endringer i resultatene eller ikke. Det er derfor interessant å finne standardavviket ved hver snittgruppe og sone. Formelen for standardavvik er som følger:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (13)$$

Det antas at dersom standardavvikene er slik at de overlapper hverandre, gir ikke parameterendringene noen signifikante endringer i resultatene.

## 4 Problemer i lab

Underveis i oppgaven oppstod en rekke problemer som kan virke inn på sluttresultatene.

### 4.1 Vannlekkasjer i tredje gjennomkjøring

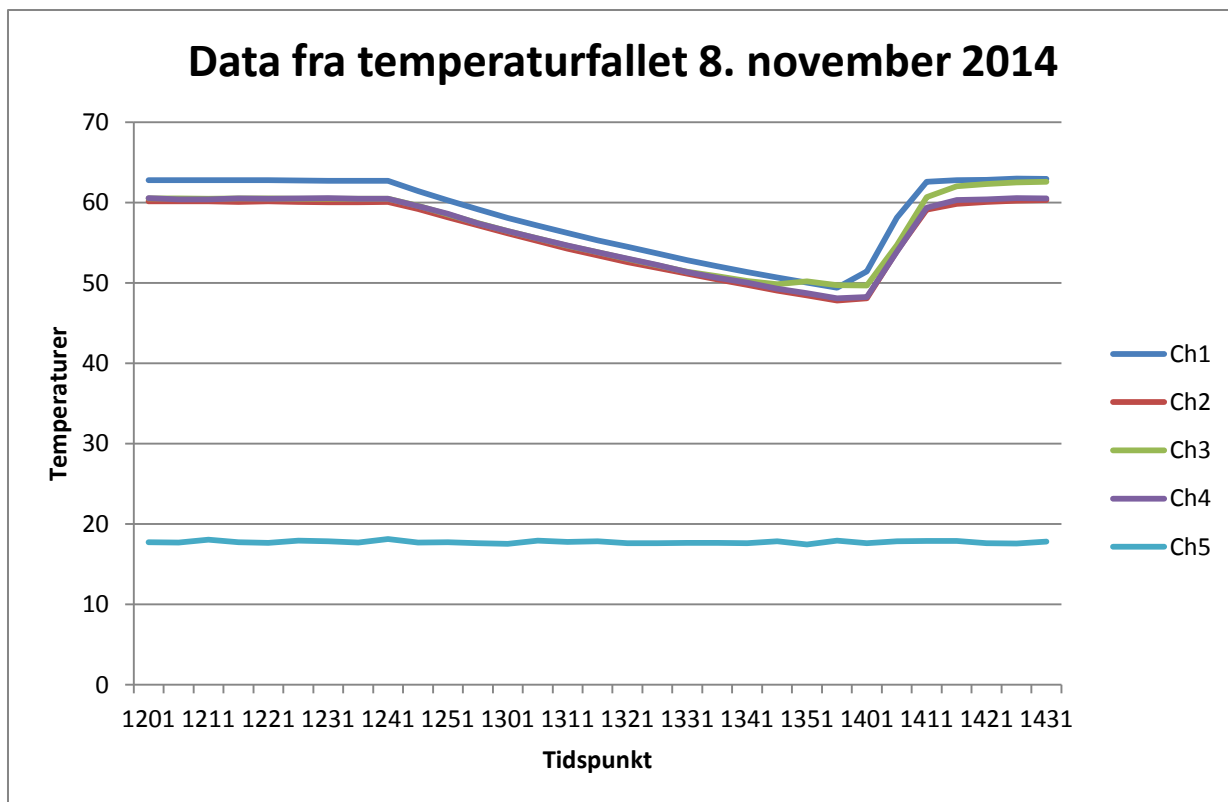
Under gjennomkjøringen av prøveobjektene som skulle utsettes for en temperatur på 60 °C, oppstod to vannlekkasjer.

Den første vannlekkasjen skjedde 8. november, litt over en uke etter oppstart, og førte til at temperaturen sank med omtrent 13 °C i løpet av en og en halv time. Årsaken til denne vannlekkasjen var at vannivået i vanntanken gikk under varmeelementets egne flottørsystem, slik at varmeelementet sluttet å varme opp vannet. Da dette skjedde, krympet vannrørene og det oppstod en liten lekkasje.

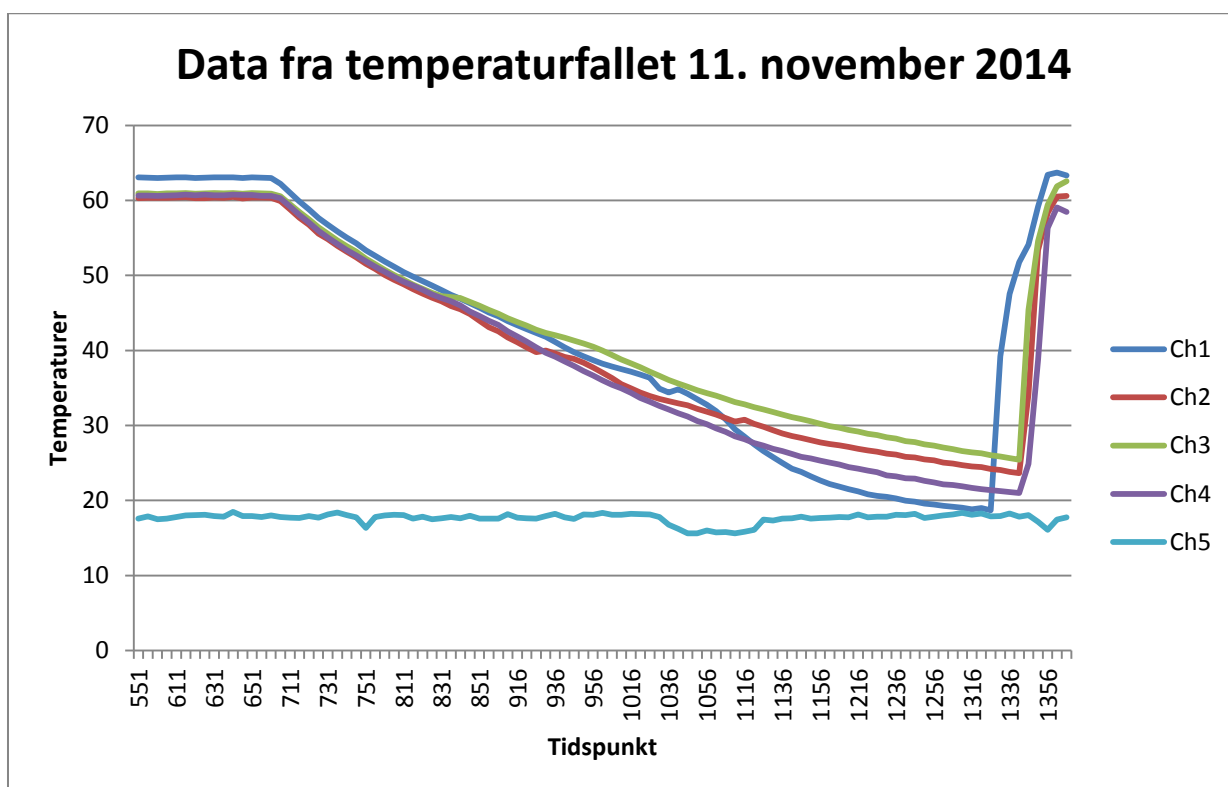
Den andre vannlekkasjen skjedde 11. november, nesten to uker ut i gjennomkjøringen, og hadde sitt opphav i at for mye vann fordampet uten at det ble gjennomført etterfylling. Dette resulterte i at flottøren i varmeelementet ga utslag og koblet ut varmeelementet. Etter at varmeelementet koblet ut, sank temperaturen i vannet med nesten 50 °C i løpet av de følgende syv timene. Etter hvert som temperaturen sank, krympet vannrørene og hastigheten til lekkasjen økte. Dette førte til at nesten alt vannet var lekket ut av testoppsettet etter kun en kort tidsperiode.

Den siste lekkasjen oppstod tidlig på morgenen, som medførte at de tre prøveobjektene stod uten tilført vann og korrekt temperatur i omtrent syv timer. Under hele denne tidsperioden ble fremdeles spenning tilført systemet. Det antas at dette vil få store konsekvenser for sluttresultatet, da dette mest sannsynlig vil skape overmetning av vann i isolasjonen. Til tross for dette ble det valgt å fortsette å kjøre den tredje gjennomkjøringen helt til de tre ukene var passert.

Figurene under viser en fremstilling av temperaturfallene. Verdiene som ble benyttet her ble hentet fra temperaturloggeren, som lastet ned verdiene hvert femte minutt. De aktuelle verdiene er også plassert i vedlegg D.



Figur 4.1: Graf som viser temperaturfallet 8. november 2014



Figur 4.2: Graf som viser temperaturfallet 11. november 2014

## 4.2 Fjerde gjennomkjøring

Siden det var uklart om vannlekkasjen som ble nevnt i kapittel 4.1 hadde stor innvirkning på gjennomkjøringen, ble det valgt å kjøre en fjerde gjennomkjøring for å teste hvor stor innvirkning den hadde. Da denne gjennomkjøringen ble utført etter at alle de andre gjennomkjøringene var ferdig, ble det nødvendig å begrense arbeidsomfanget. I tillegg vil en sammenlikning mellom et av prøveobjektene være tilstrekkelig for å se hvordan lekkasjen virker inn på resultatene. Det ble derfor valgt å kun se på en av de tre typene prøveobjekter: prøveobjektet med inntakt leder. Dette prøveobjektet ble valgt siden arbeidet med å fremstille det er enkelt og ikke særlig tidskrevende.

Den fjerde gjennomkjøringen ble derfor utført til slutt med et prøveobjekt med leder som utsettes for en konstant temperatur på 60 °C.

## 4.3 Endring i temperaturmålerne

Etter at vannlekkasjen som ble nevnt i kapittel 4.1 var fikset og systemet satt opp igjen, ble det målt en betraktelig stor endring i temperaturmålingene, først i et av prøveobjektene, og deretter i to av dem. Første antagelse var at temperaturmåleren hadde løsnet fra vannrøret, og dermed ikke målte den korrekte temperaturen. Dette ble undersøkt uten resultater. Deretter ble det antatt at resterende vann i armaflexen førte til reduserte temperaturer, og systemet ble dermed stående med den gitte temperaturen. Denne antagelsen ble motbevist da feilmålingen ikke ble bedret i tiden etter at vannlekkasjen var rettet opp. Etter at gjennomkjøring nummer tre var ferdig, ble alle tre målenoder plassert på den samme kabelen for å teste dem. Det kom da frem at noen av målenodene målte feil.

I den fjerde gjennomkjøringen ble en ekstra målenode benyttet til videre temperaturmålinger.

## 4.4 Varmgang i varmeelement

Etter at den store vannlekkasjen skjedde, ble vannsirkulasjonen stadig kontrollert ved å løfte en av vannslangene ut av vanntanken for visuelt å analysere vannstrømmen. Under en av disse kontrollene ble det sølt vann direkte på variacen som umiddelbart slo seg selv av. Under denne hendelsen var det kun en bryter som slo ut, og variacen tok ingen skade. Da variacen ble slått på igjen, ville ikke lengre varmeelementet varme opp vannet. Da dette ble oppdaget, ble spenningen slått av og varmeelementet byttet ut. Prosessen med å bytte ut varmeelementet tok i overkant av et døgn, men siden temperaturendringene skjedde uten at prøveobjektene ble utsatt for spenning eller at de mistet vanntilførselen, antas denne skaden som minimal.

## 4.5 Følger av problemene

Problemene som oppstod underveis i oppgaven, antas å virke inn på sluttresultatene. Det antas at vannlekkasjen har ført til dårlige, eller i verste tilfelle ubrukelige, resultater. Dette medfører en stor reduksjon i oppgavens helhetsinntrykk og tyngde. I hvilken grad problemene har påvirket resultatene, vil oppdages når alle snittene fra alle fire gjennomkjøringer er ferdig analysert.

Antallet prøveobjekter går fra ni stykker til ti, som igjen fører til at antallet snitt som analyseres går fra 90 til 100 snitt. Dette medfører kun en liten økning i arbeidsmengde.

## 5 Resultater

I denne delen av oppgaven fremstilles de resultater som er produsert underveis i oppgaven. Resultatene vil først bli lagt frem i tabeller før de så fremstilles ved å ta i bruk grafer.

### 5.1 Krymping av prøveobjektene

Når lederen trekkes ut av ledergangen vil isolasjonen rundt trekke seg sammen og krympe. Videre følger en tabell som viser hvor mye isolasjonen i fire av de seks prøveobjektene krympet når lederen ble fjernet. Tallet som viser prosent representerer prosentvis krymping av kabelen.

	Prøveobjekt 1	Prøveobjekt 2	Prøveobjekt 3	Prøveobjekt 4
0-50 cm	49,6 cm = 0,80 %	49,6 cm = 0,80 %	49,6 cm = 0,80 %	49,8 cm = 0,40 %
50 – 100 cm	49,4 cm = 1,20 %	49,6 cm = 0,80 %	49,5 cm = 1,00 %	49,4 cm = 1,20 %
100 – 150 cm	49,8 cm = 0,40 %	49,7 cm = 0,73 %	49,4 cm = 1,20 %	49,6 cm = 0,80 %

Tabell 5.1: Krympingen av de 12 målingene

Dette vil si at kablene krymper i gjennomsnitt 0,83 % eller 0,83 cm per meter med standardavvik,  $\sigma$ , som er 0,27 % eller 0,27 cm.

### 5.2 Mikroskopanalyse

I mikroskopanalysen ble hvert snitt analysert. Her var det av interesse å finne hvor mange trær, med en lengde på 30  $\mu\text{m}$  eller lengre, som oppstod i de sonene som ligger ved halvlederne. Etter at alle vanntrærne var telt, ble hele snittets masse analysert for å finne det største treet. Under følger det flere tabeller som viser resultatene for hvert snitt, etterfulgt av figurer som fremstiller gjennomsnittlig antall vanntrær per volumenhet, gjennomsnittlig maksimal vanntrelengde og standardavvik.



### 5.2.1 Resultater fra første gjennomkjøring, 40 °C

40 °C, gjennomsnittlig antall vantrær (stk.):

	Med leder, uten strekk	Uten leder, med strekk	Uten leder, uten strekk
Sone 1	44	72,5	51
Sone 3	77,8	90,6	56,1

Tabell 5.2: Gjennomsnittlig antall vantrær ved 40 °C

40 °C, gjennomsnittlig antall vantrær per volum (stk./V):

	Med leder, uten strekk	Uten leder, med strekk	Uten leder, uten strekk
Sone 1	4,517946772	7,444344112	5,236711031
Sone 3	5,00293114	5,826035493	3,607512043

Tabell 5.3: Gjennomsnittlig antall vantrær per volum ved 40 °C

40 °C, standardavvik,  $\sigma$  (1):

	Med leder, uten strekk	Uten leder, med strekk	Uten leder, uten strekk
Sone 1	0,871273854	0,889536518	0,549125296
Sone 3	0,561188026	0,667782245	0,200173608

Tabell 5.4: Standardavviket for gjennomsnittlig antall vantrær ved 40 °C

40 °C, gjennomsnittlig maksimal trelengde ( $\mu\text{m}$ ):

	Med leder, uten strekk	Uten leder, med strekk	Uten leder, uten strekk
Gjennomsnittlig lengde	60,3141	65,543	67,5279
Standardavvik	9,96031957	9,68119254	21,7264381

Tabell 5.5: Gjennomsnittlig maksimal trelengde ved 40 °C

### 5.2.2 Resultater fra andre gjennomkjøring, 18 °C

18 °C, gjennomsnittlig antall vantrær (stk.):

	Med leder, uten strekk	Uten leder, med strekk	Uten leder, uten strekk
Sone 1	27,7	92,3	49,2
Sone 3	51,6	100,3	33,7

Tabell 5.6: Gjennomsnittlig antall vantrær ved 18 °C

18 °C, gjennomsnittlig antall vantrær per volum (stk./V):

	Med leder, uten strekk	Uten leder, med strekk	Uten leder, uten strekk
Sone 1	2,844252854	9,47742016	5,051885936
Sone 3	3,31812924	6,449794259	2,167079427

Tabell 5.7: Gjennomsnittlig antall vantrær per volum ved 18 °C

18 °C, standardavvik,  $\sigma$  (1):

	Med leder, uten strekk	Uten leder, med strekk	Uten leder, uten strekk
Sone 1	0,340707813	1,321392118	0,427822178
Sone 3	0,59855512	1,166759747	0,396454967

Tabell 5.8: Standardavviket for gjennomsnittlig antall vanntrær ved 18 °C

18 °C, gjennomsnittlig maksimal trelengde ( $\mu\text{m}$ ):

	Med leder, uten strekk	Uten leder, med strekk	Uten leder, uten strekk
Gjennomsnittlig lengde	64,1789	71,5813	69,2882
Standardavvik	5,51471128	10,7069638	9,95331792

Tabell 5.9: Gjennomsnittlig maksimal trelengde ved 18 °C

### 5.2.3 Resultater fra tredje gjennomkjøring, 60 °C

1. gjennomkjøring av 60 °C, gjennomsnittlig antall vanntrær (stk.):

	Med leder, uten strekk	Uten leder, med strekk	Uten leder, uten strekk
Sone 1	984,8	963,8	1013,4
Sone 3	1626,2	1516,2	1507,4

Tabell 5.10: Gjennomsnittlig antall vanntrær ved første gjennomkjøring ved 60 °C

1. gjennomkjøring av 60 °C, gjennomsnittlig antall vanntrær per volum (stk./V):

	Med leder, uten strekk	Uten leder, med strekk	Uten leder, uten strekk
Sone 1	101,1198632	96,19119399	104,0565286
Sone 3	104,5728357	97,49928271	96,93339847

Tabell 5.11: Gjennomsnittlig antall vanntrær per volum ved første gjennomkjøring ved 60 °C

1. gjennomkjøring av 60 °C, standardavvik,  $\sigma$  (1):

	Med leder, uten strekk	Uten leder, med strekk	Uten leder, uten strekk
Sone 1	5,71531741	6,496169661	5,637006424
Sone 3	6,820869158	5,316653187	2,974647983

Tabell 5.12: Standardavviket for gjennomsnittlig antall vanntrær ved første gjennomkjøring ved 60 °C

1. gjennomkjøring av 60 °C, gjennomsnittlig maksimal trelengde ( $\mu\text{m}$ ):

	Med leder, uten strekk	Uten leder, med strekk	Uten leder, uten strekk
Gjennomsnittlig lengde	155,1543	185,2083	166,6022
Standardavvik	12,8680863	26,402981	8,31084074

Tabell 5.13: Gjennomsnittlig maksimal trelengde ved første gjennomkjøring ved 60 °C

## 5.2.4 Resultater fra fjerde gjennomkjøring, 60 °C

2. gjennomkjøring av 60 °C, gjennomsnittlig antall vantrær (stk.):

	Med leder, uten strekk
Sone 1	42,5
Sone 3	128,4

Tabell 5.14: Gjennomsnittlig antall vantrær ved andre gjennomkjøring ved 60 °C

2. gjennomkjøring av 60 °C, gjennomsnittlig antall vantrær per volum (stk./V):

	Med leder, uten strekk
Sone 1	4,363925859
Sone 3	8,25676553

Tabell 5.15: Gjennomsnittlig antall vantrær per volum ved andre gjennomkjøring ved 60 °C

2. gjennomkjøring av 60 °C, standardavvik,  $\sigma$  (1):

	Med leder, uten strekk
Sone 1	0,746467543
Sone 3	0,610186608

Tabell 5.16: Standardavviket for gjennomsnittlig antall vantrær ved andre gjennomkjøring ved 60 °C

2. gjennomkjøring av 60 °C, gjennomsnittlig maksimal trelengde ( $\mu\text{m}$ ):

	Med leder, uten strekk
Gjennomsnittlig lengde	72,9214
Standardavvik	13,3153418

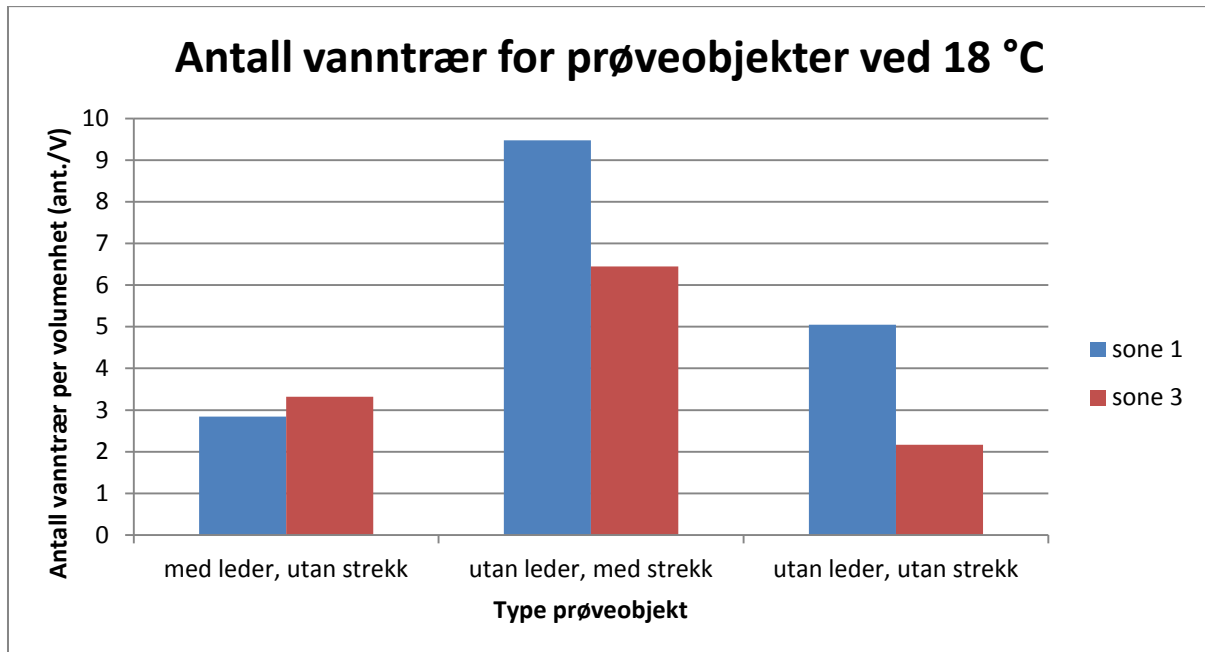
Tabell 5.17: Gjennomsnittlig maksimal trelengde ved andre gjennomkjøring ved 60 °C

## 5.2.5 Fremstillinger

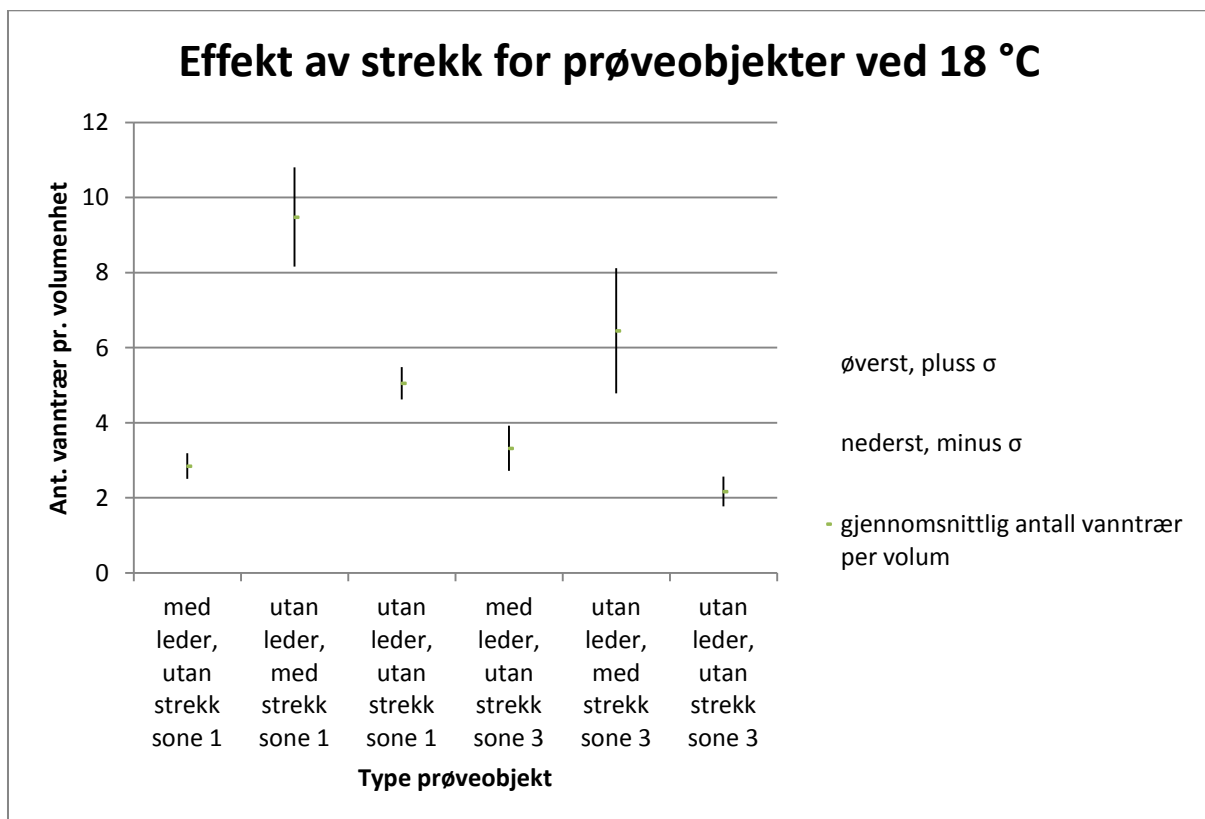
Ved å ta i bruk Microsoft Excel ble de ulike resultatene fremstilt både alene og sammen. Dette gir en bedre oversikt over effekten av de ulike mekaniske kreftene og temperaturforskjellene. For å se flere fremstillinger av resultatene, se vedlegg F.

### Fremstillinger av antall vanntrær ved 18 °C:

Figurene under viser resultatene av gjennomkjøringen ved 18 °C og effekten av de ulike mekaniske spenningene de ulike prøveobjektene ble utsatt for.



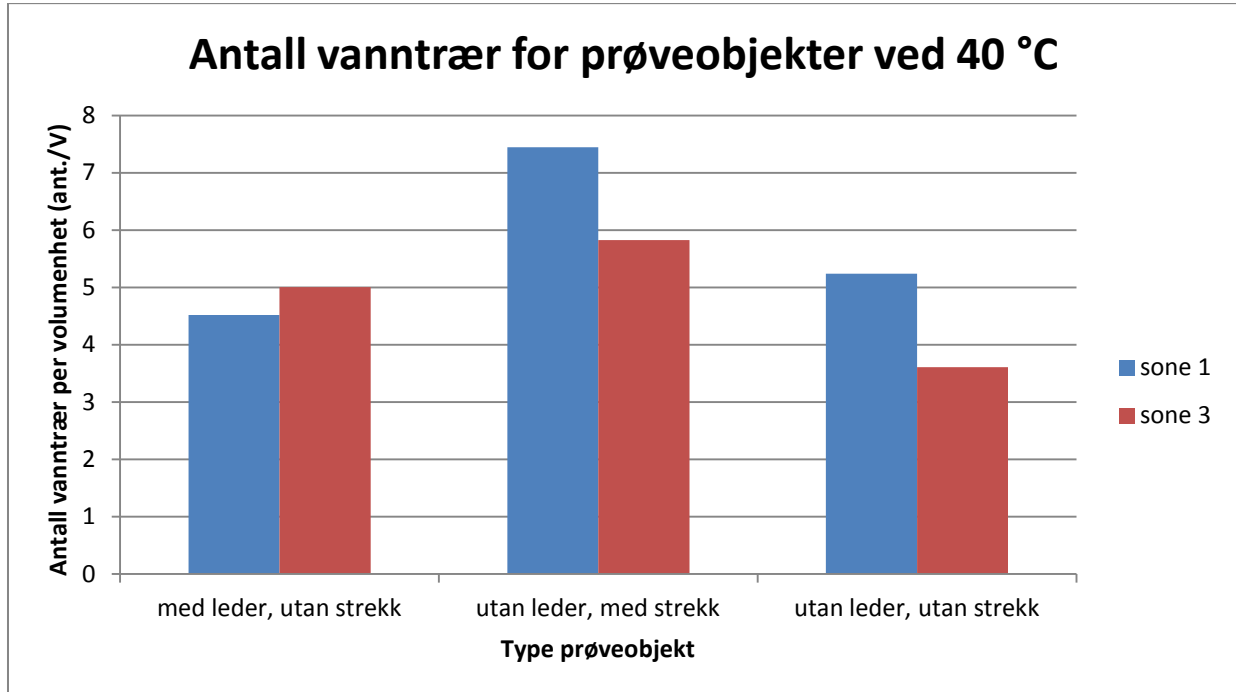
Figur 5.1: Grafer som viser antall vanntrær for prøveobjekter ved 18 °C



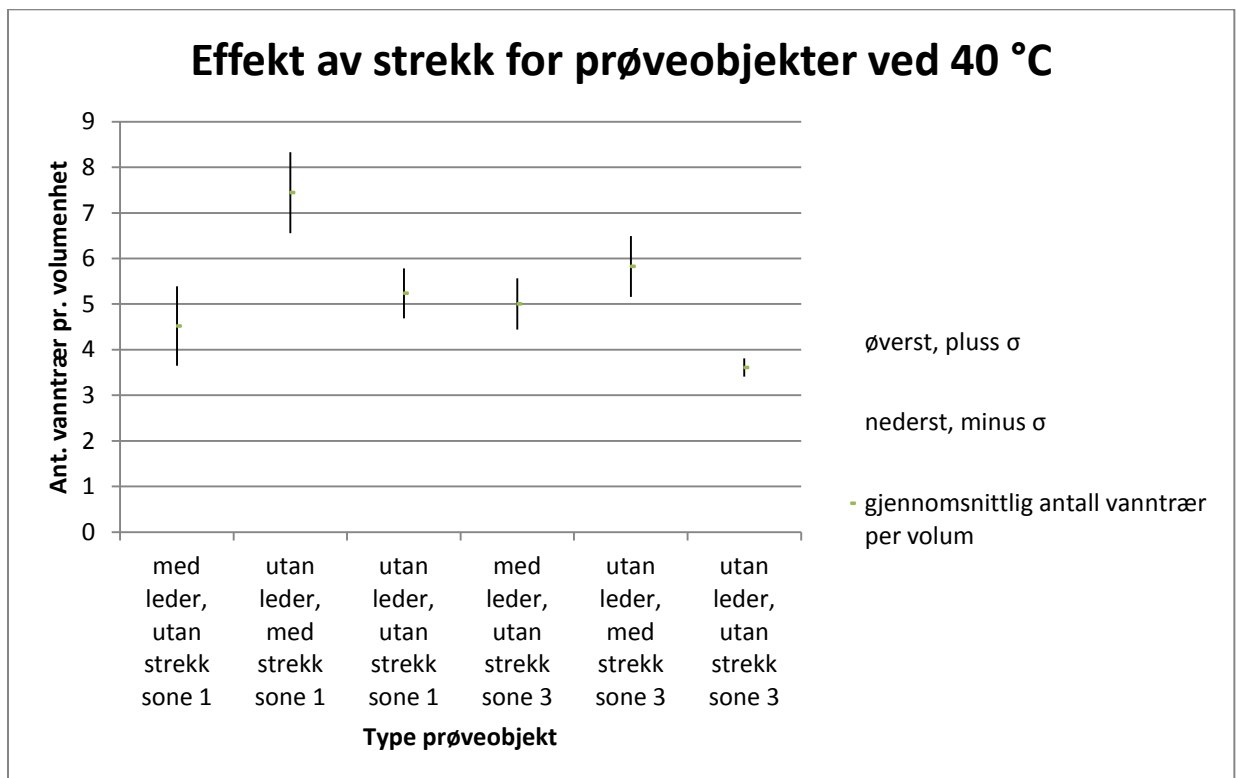
Figur 5.2: Standardavvik som viser effekten av strekk for prøveobjekter ved 18 °C

### Fremstillinger av antall vanntrær ved 40 °C:

Figurene under viser resultatene av gjennomkjøringen ved 40 °C og effekten av de ulike mekaniske spenningene de ulike prøveobjektene ble utsatt for.



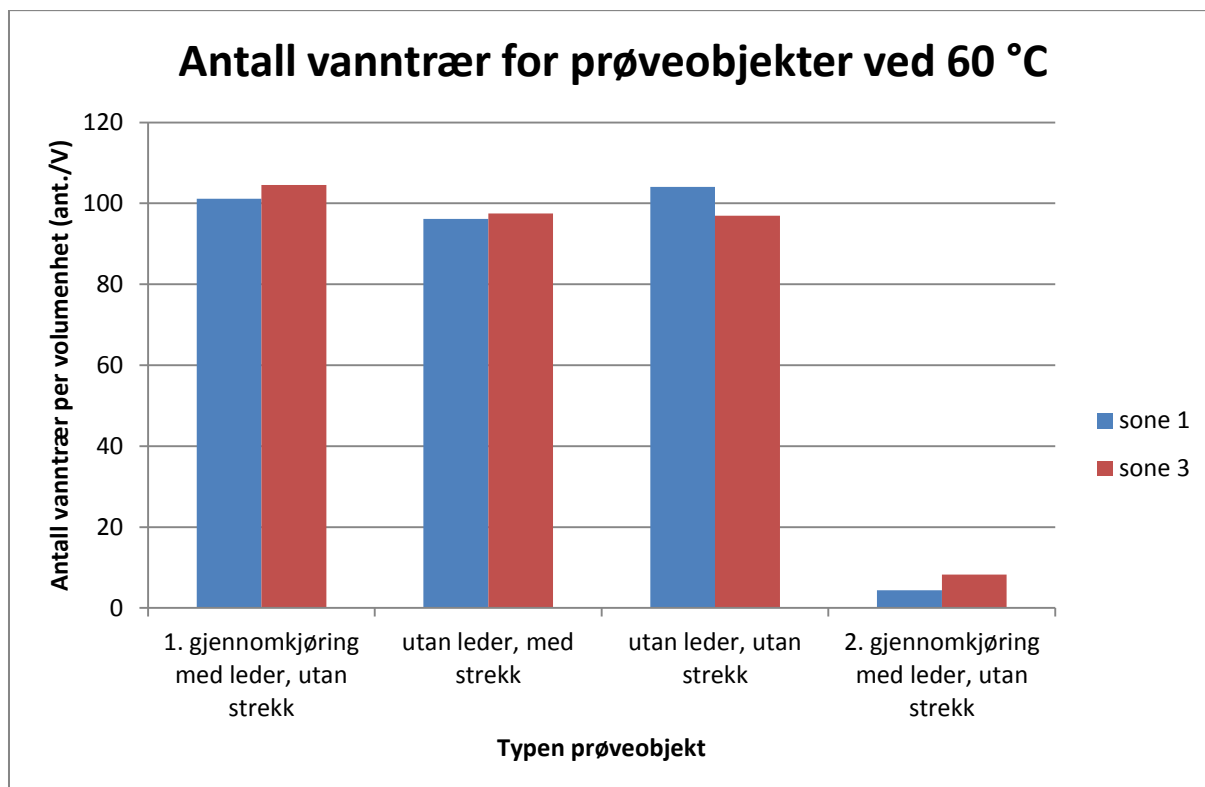
Figur 5.3: Grafer som viser antall vanntrær for prøveobjekter ved 40 °C



Figur 5.4: Standardavvik som viser effekten av strekk for prøveobjekter ved 40 °C

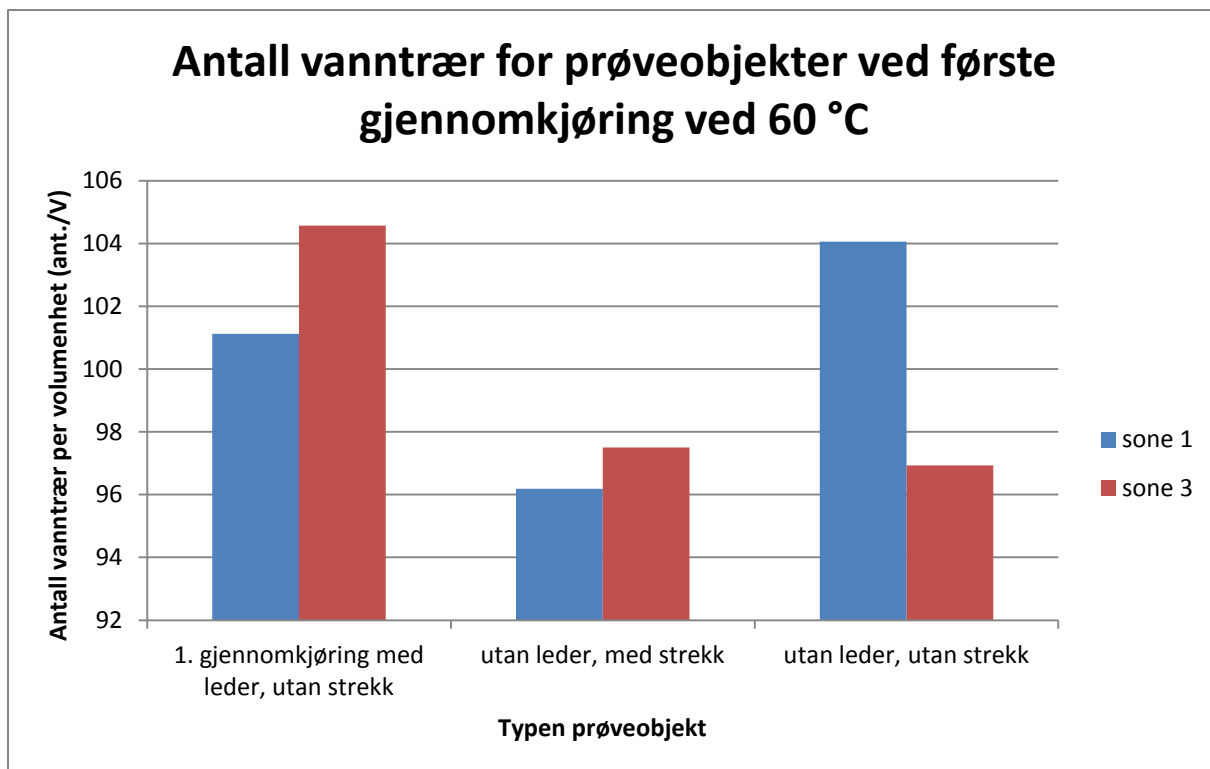
### Fremstillinger av antall vanntrær ved 60 °C:

Figurene under viser resultatene av de to gjennomkjøringene ved 60 °C og effekten av de ulike mekaniske spenningene de ulike prøveobjektene ble utsatt for.

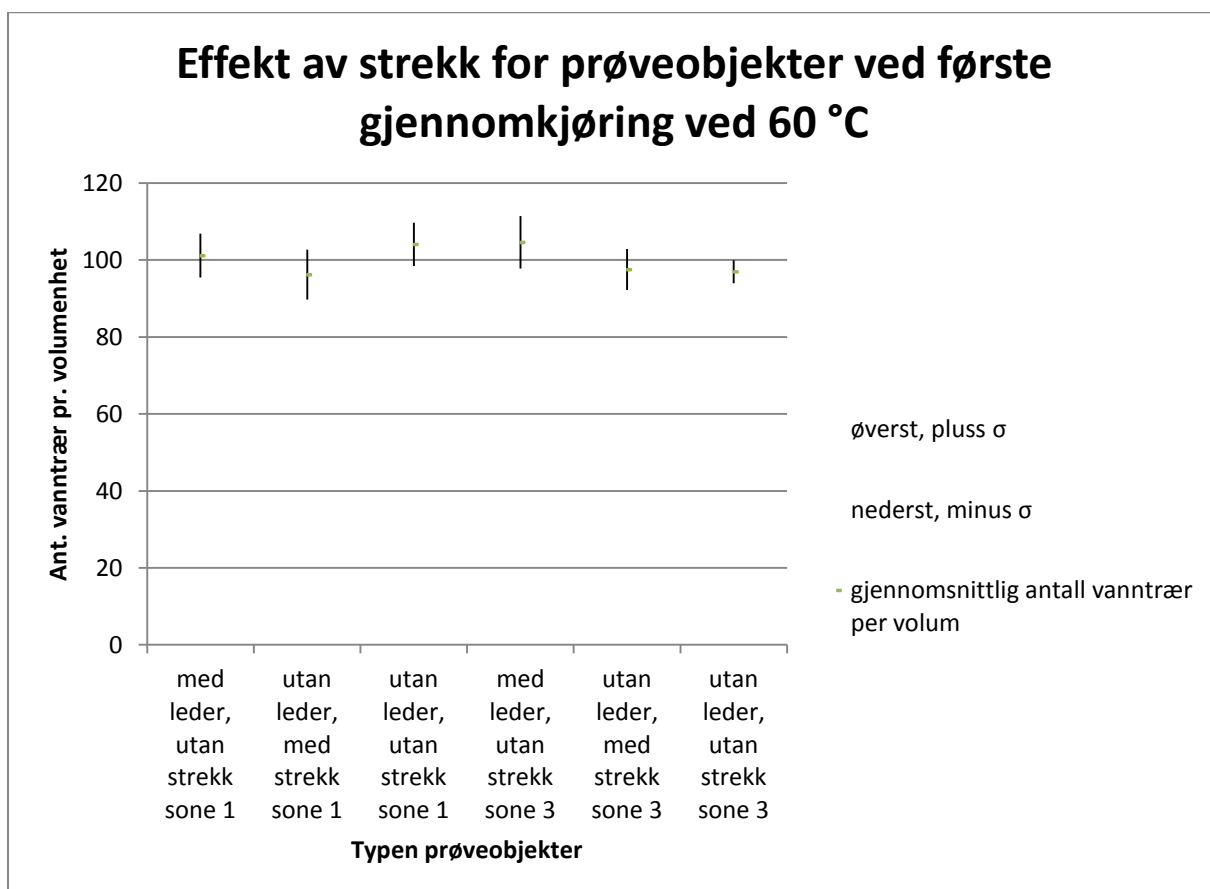


Figur 5.5: Grafer som viser antall vanntrær for prøveobjekter ved 60 °C

Da det i denne figuren er tydelig at den første gjennomkjøringen ved 60 °C eldes på en helt annen måte enn de andre gjennomkjøringene, og at antallet vanntrær dermed er mye høyere, vil ikke alle fire prøveobjekter fremstilles sammen videre.



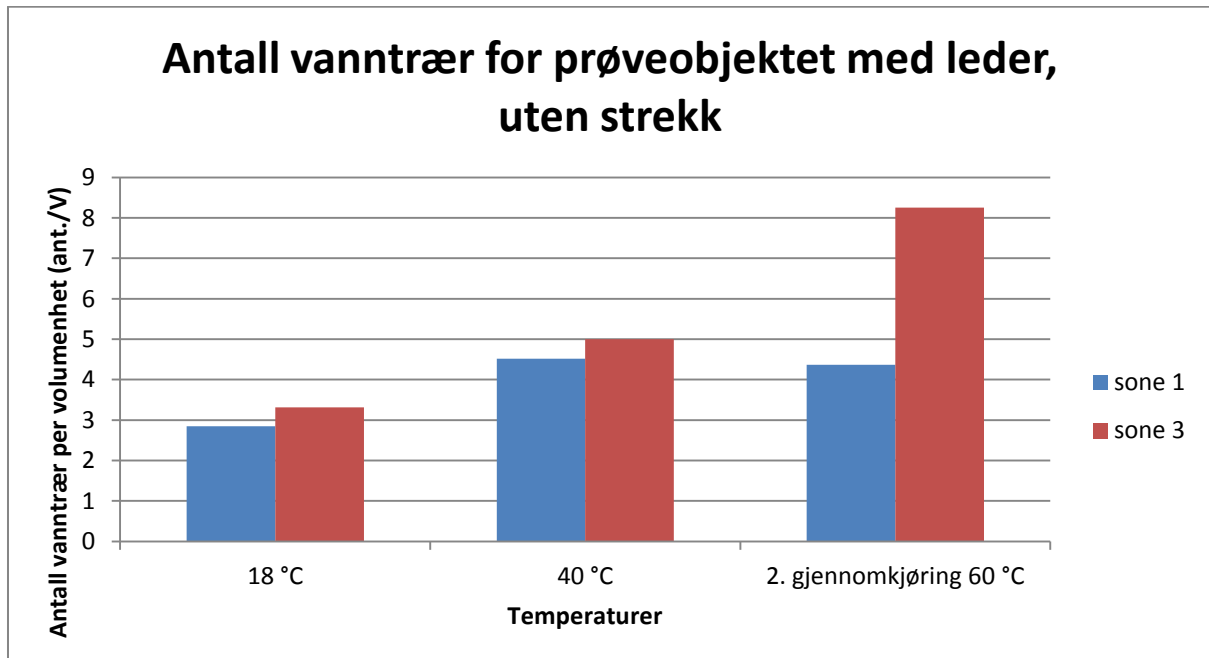
Figur 5.6: Grafer som viser antall vanntrær for prøveobjekter ved første gjennomkjøring ved 60 °C



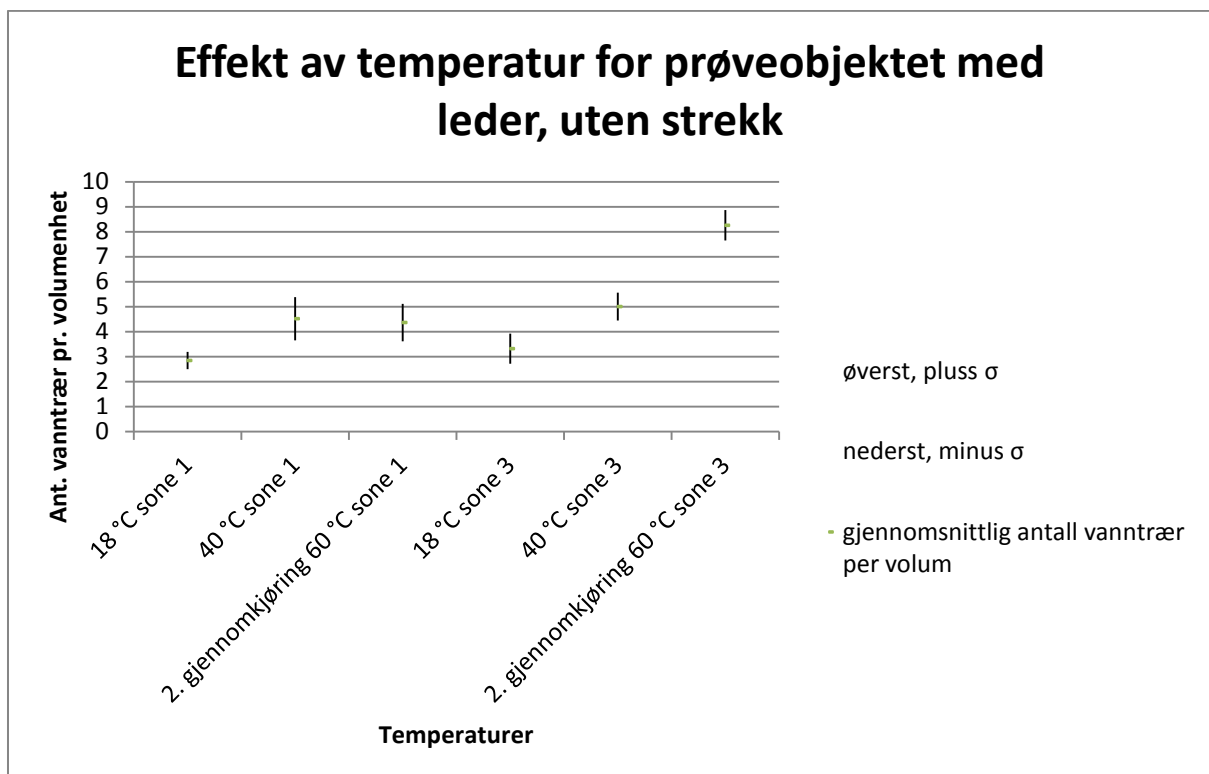
Figur 5.7: Standardavvik som viser effekten av strekk for prøveobjekter ved første gjennomkjøring ved 60 °C

### Fremstillinger av antall vanntær i prøveobjektet med leder, uten strekk:

I disse figurene vil de ulike effektene av temperatur fremstilles. Dette gjøres ved å se på hvert enkelt prøveobjekt. Her vil ikke den første gjennomkjøringen av 60 °C bli fremstilt, kun den andre gjennomkjøringen.



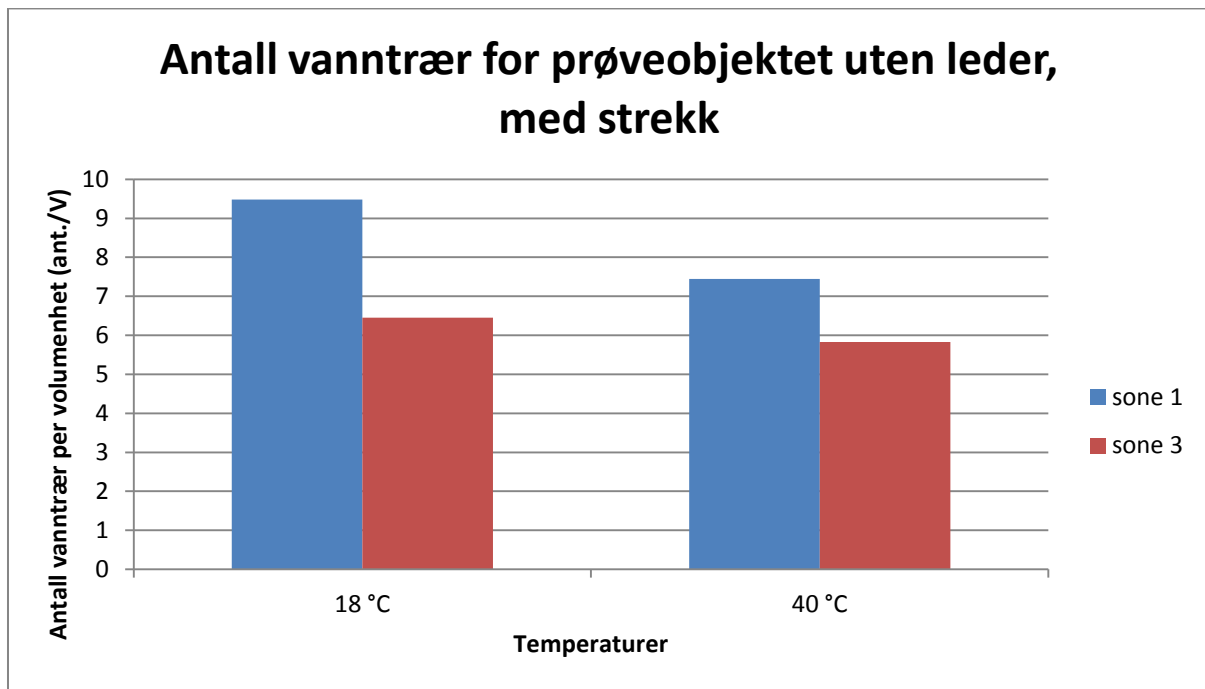
Figur 5.8: Grafer som viser antall vanntær for prøveobjektet med leder, uten strekk



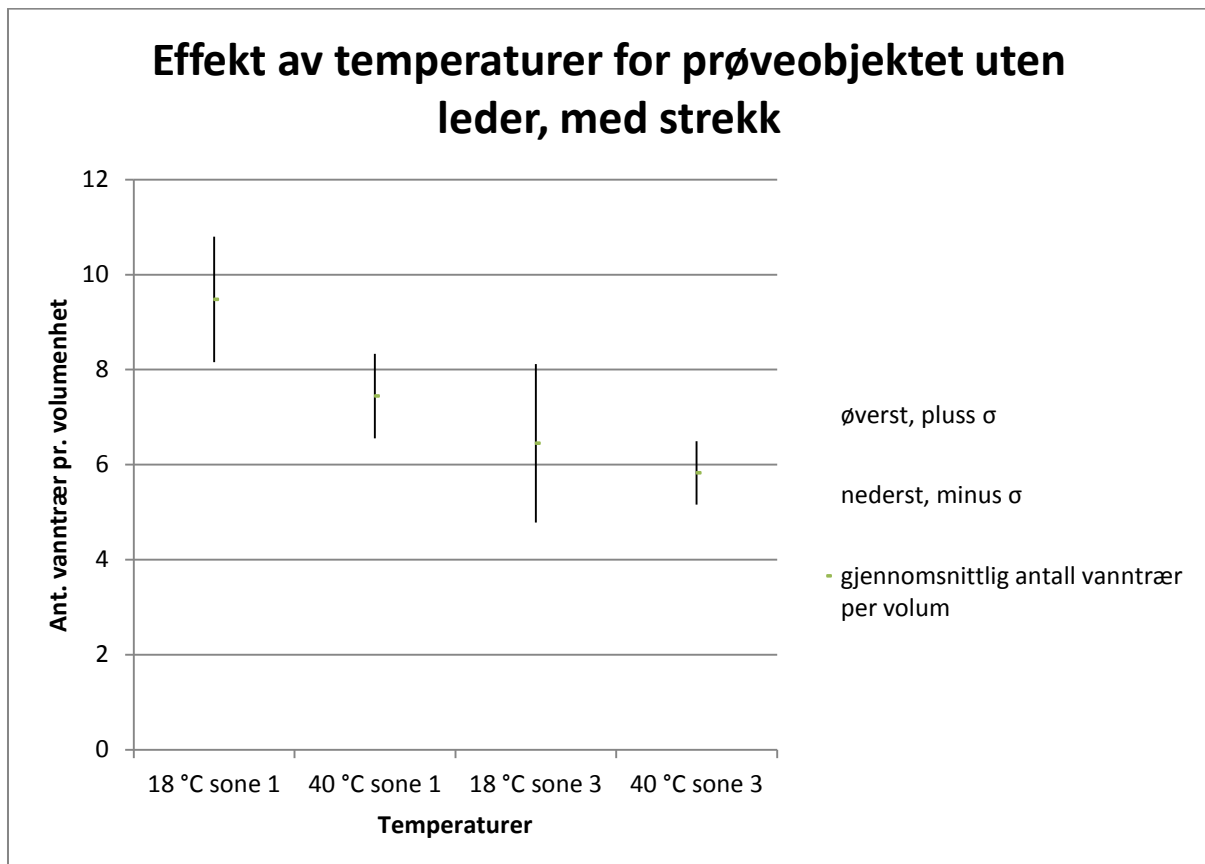
Figur 5.9: Standardavvik som viser effekten av temperatur for prøveobjektet med leder, uten strekk



*Fremstillinger av antall vanntrær i prøveobjektet uten leder, med strekk:*

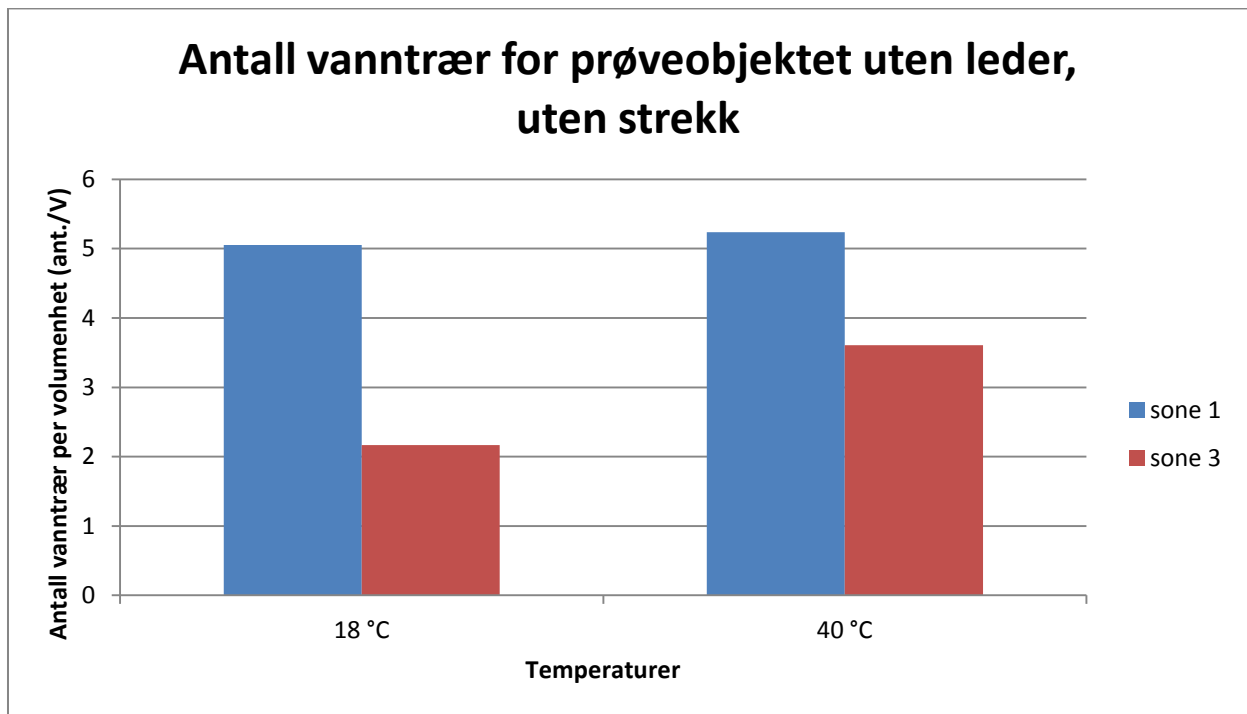


Figur 5.10: Grafer som viser antall vanntrær for prøveobjektet uten leder, med strekk

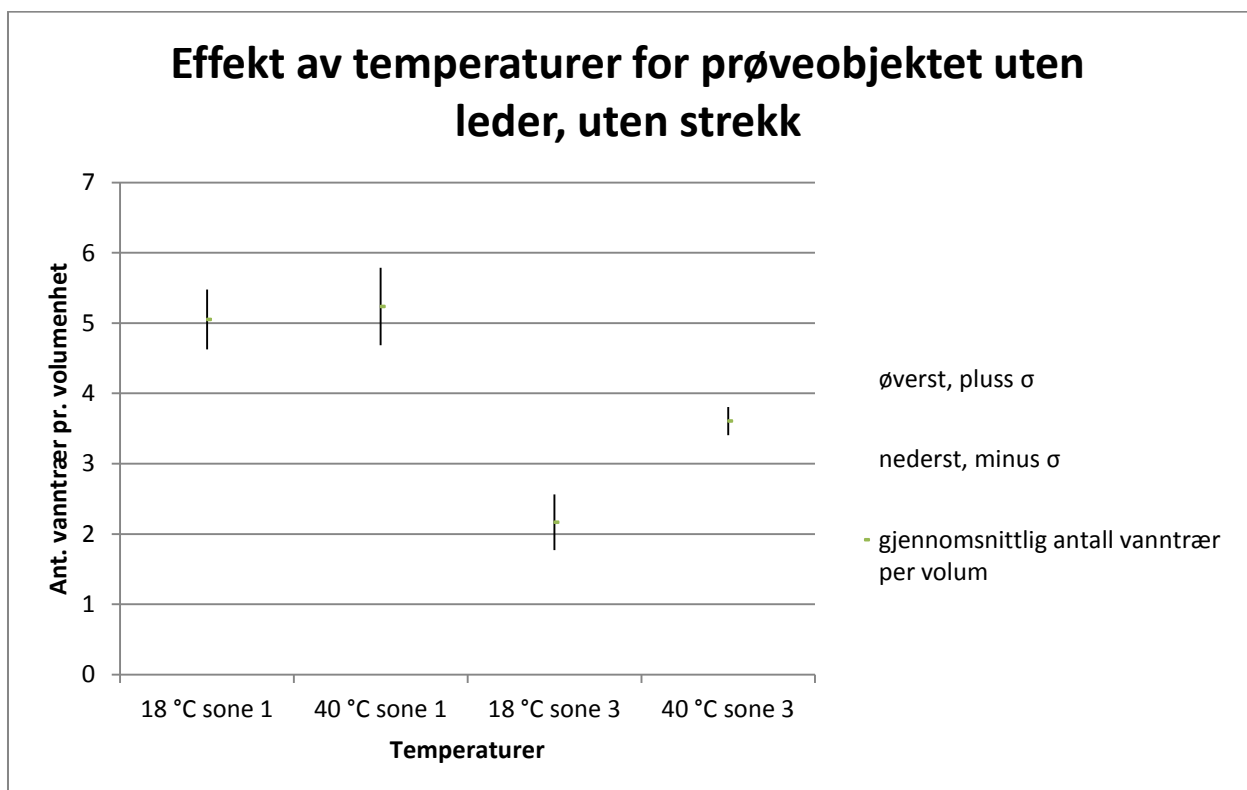


Figur 5.11: Standardavvik som viser effekten av temperatur for prøveobjektet uten leder, med strekk

*Fremstillinger av antall vanntrær i prøveobjektet uten leder, uten strekk:*



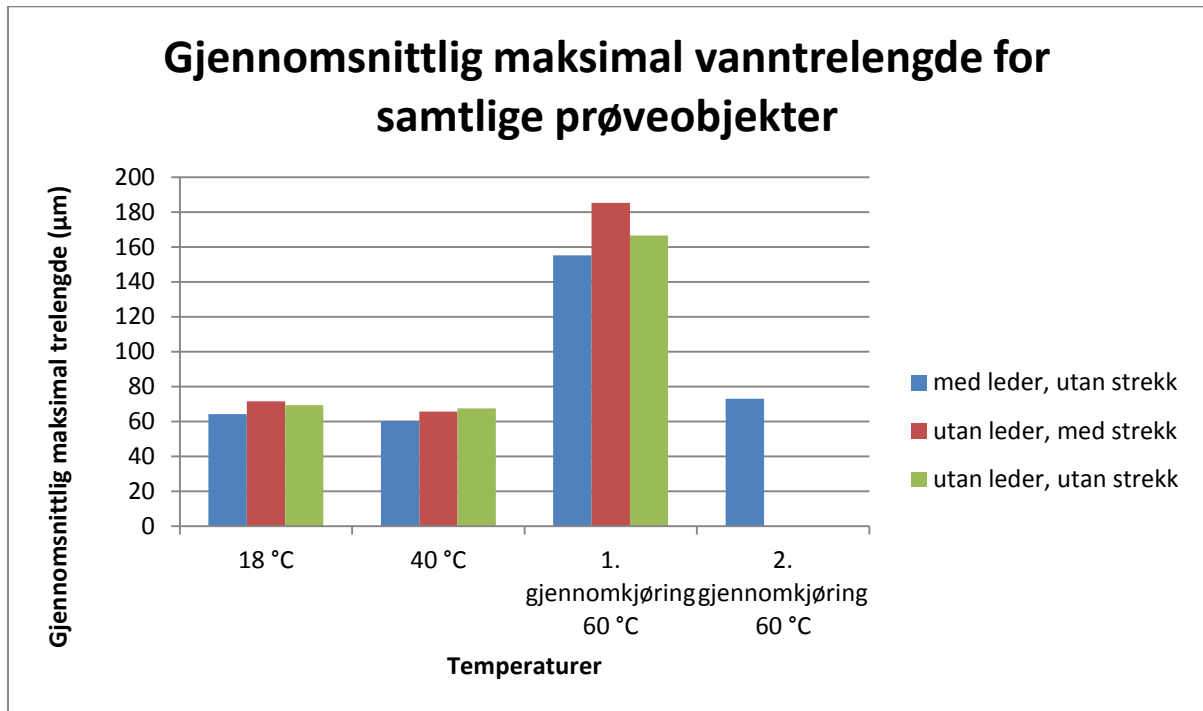
Figur 5.12: Grafer som viser antall vanntrær for prøveobjektet uten leder, uten strekk



Figur 5.13: Standardavvik som viser effekten av temperatur for prøveobjektet uten leder, uten strekk

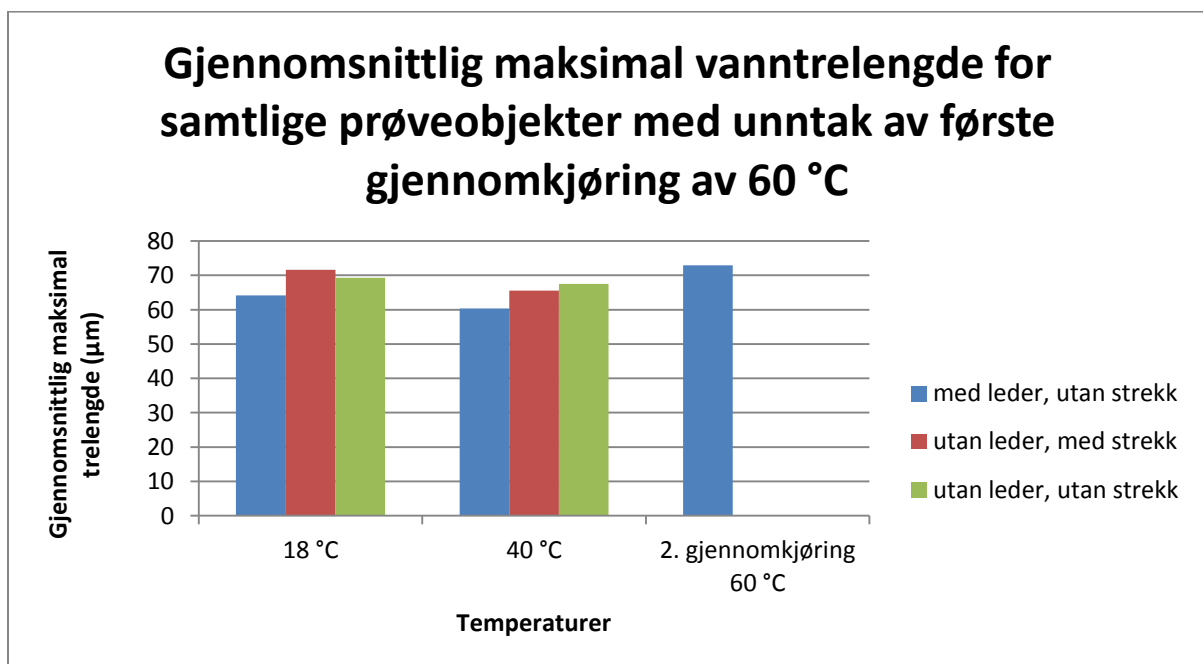
### Fremstillinger av gjennomsnittlig maksimal vanntrelengde:

Under følger grafer som fremstiller resultatene av gjennomsnittlig maksimal vanntrelengde.



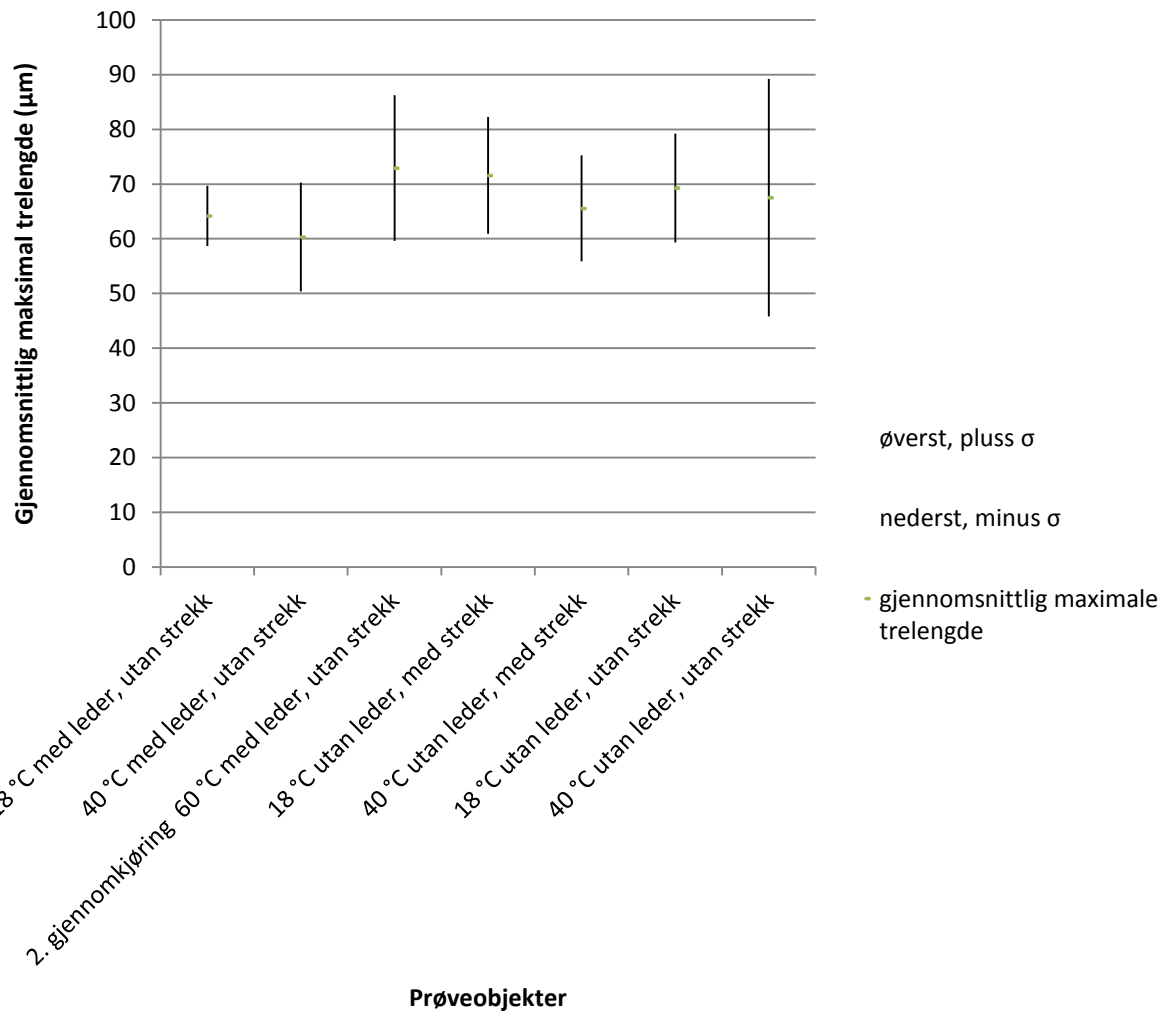
Figur 5.14: Grafer som viser gjennomsnittlig maksimal vanntrelengde for samtlige prøveobjekter

Som i delen med antall vanntreer vil ikke den første gjennomkjøringen av 60 °C bli benyttet videre i disse resultatene

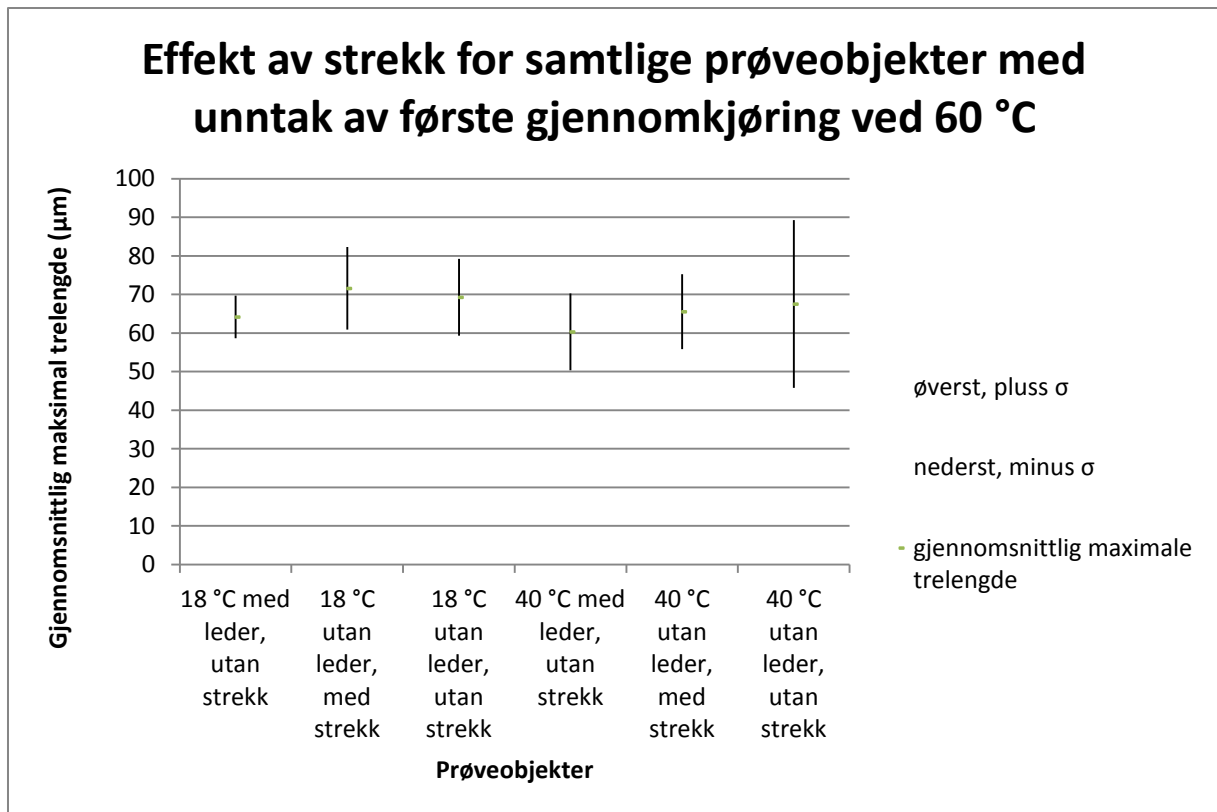


Figur 5.15: Grafer som viser gjennomsnittlig maksimal vanntrelengde for samtlige prøveobjekter med unntak av første gjennomkjøring 60 °C

## Effekt av temperaturer på maksimal gjennomsnittlig trelengde for samtlige prøveobjekter med unntak av første gjennomkjøring ved 60 °C



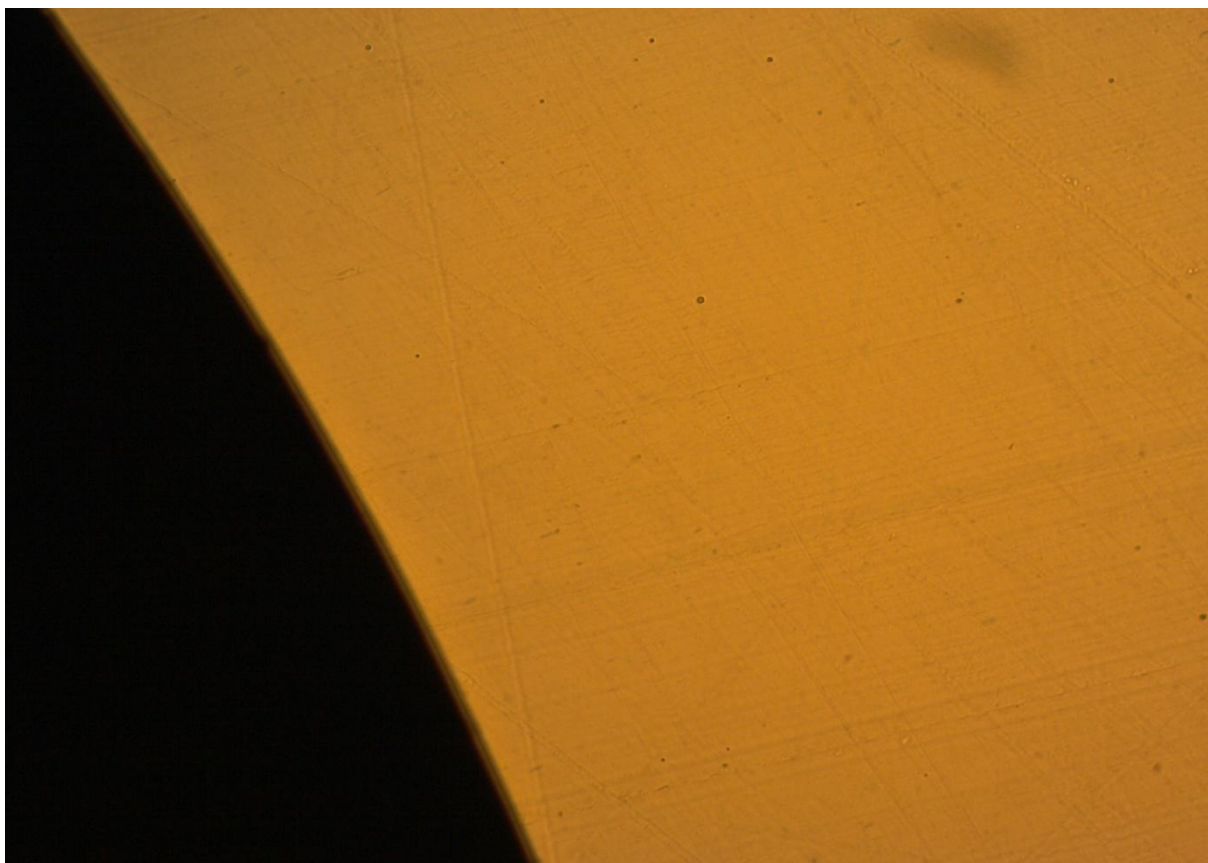
Figur 5.16: Standardavvik som viser effekten av temperaturer på gjennomsnittlig maksimal trelengde for samtlige prøveobjekter med unntak av første gjennomkjøring ved 60 °C



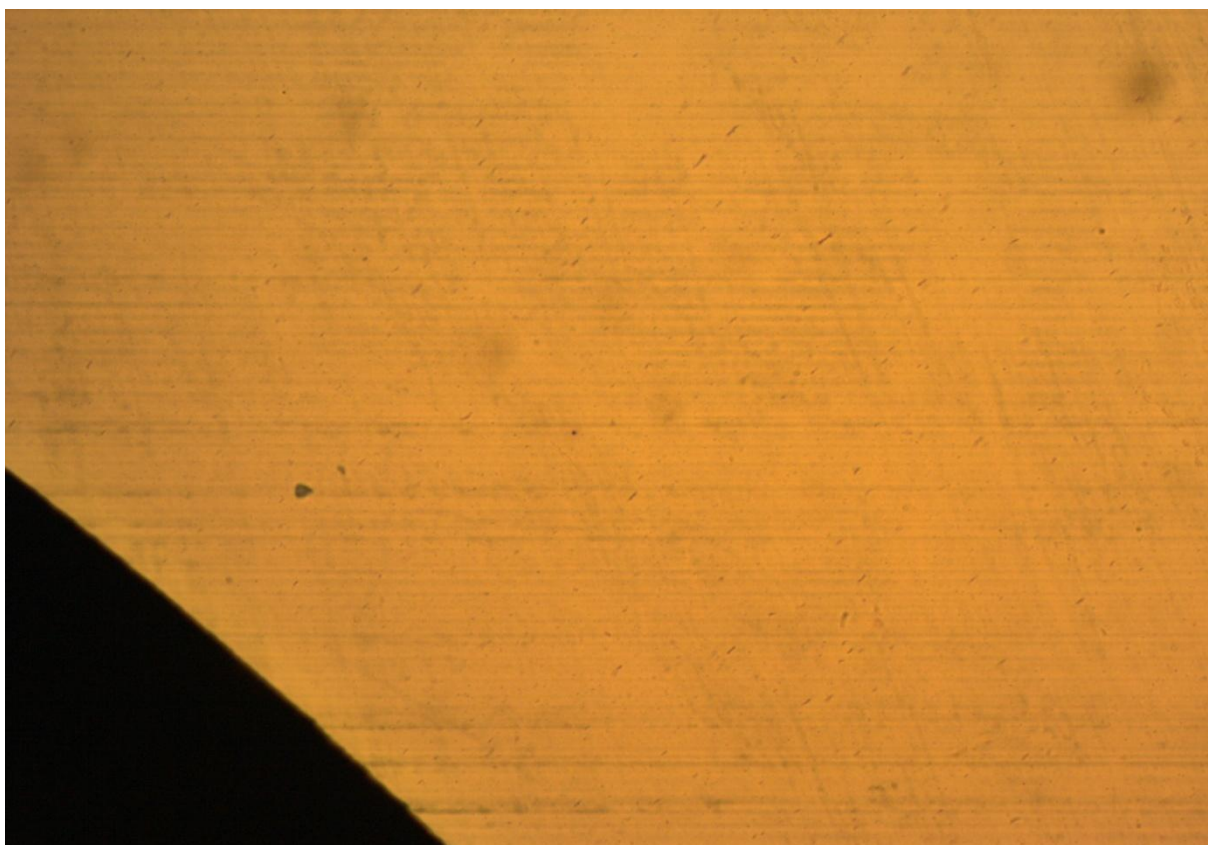
Figur 5.17: Standardavvik som viser effekten av strekk for samtlige prøveobjekter med unntak av første gjennomkjøring ved 60 °C

## 5.2.6 Observasjoner

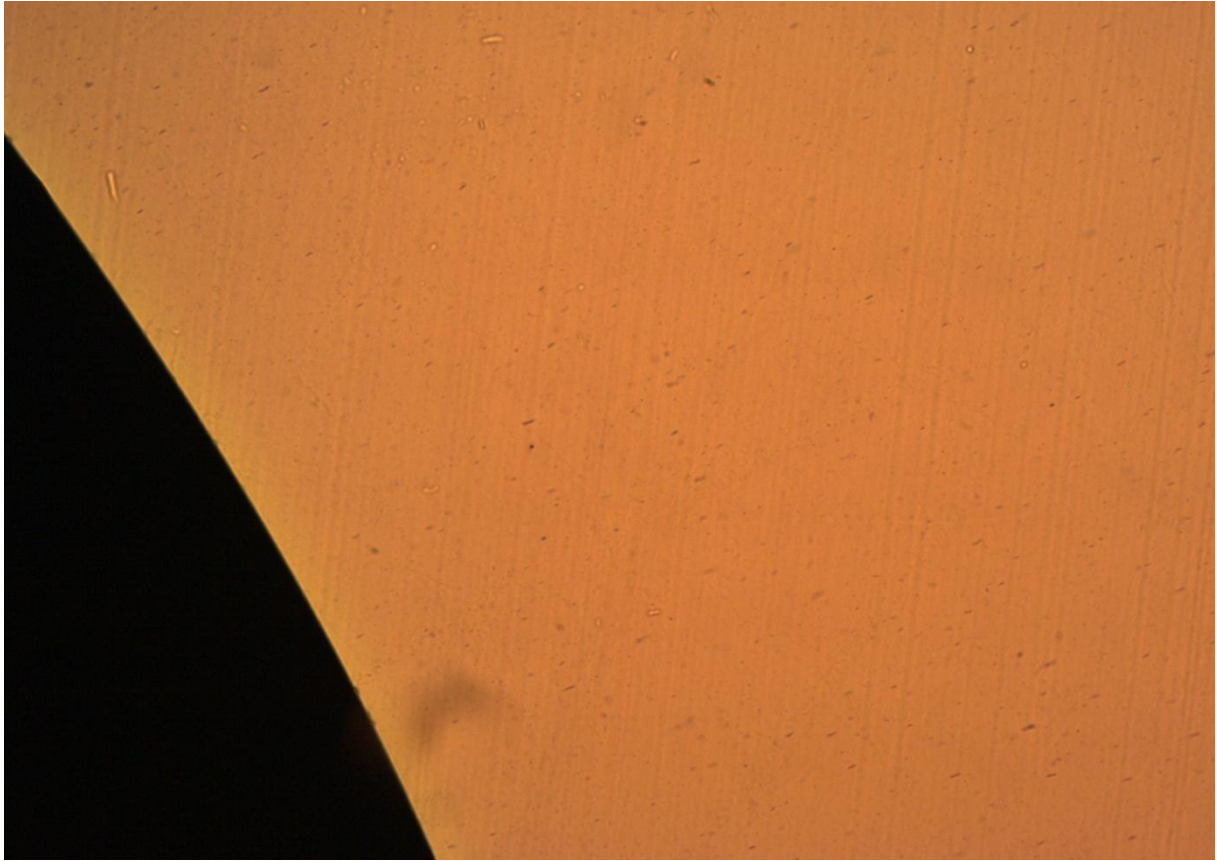
Siden det i løpet av snittanalysen kun ble telt vantrær av størrelsesorden 30 µm, eller større, var det viktig å gjøre observasjoner etter hvert som temperaturen økte. I denne oppgaven ble det observert at det ved 18 °C var veldig lav tetthet av vantrær, store og små, både ved indre og ytre halvleder. Når temperaturen økte, ble det observert at tettheten økte, og da spesielt ved den indre halvlederen. Det må nevnes at resultatene over ikke gir et så klart bilde på dette, da flertallet av de trærne som ble observert var for korte til å telles med i resultatene. Det var ingen signifikante endringer i tettheten mellom de ulike prøveobjektene. Figurene under viser hvordan tettheten av vantrær øker ved økende temperaturer.



Figur 5.18: Tetthet av vanntær ved indre halvleder ved 18 °C



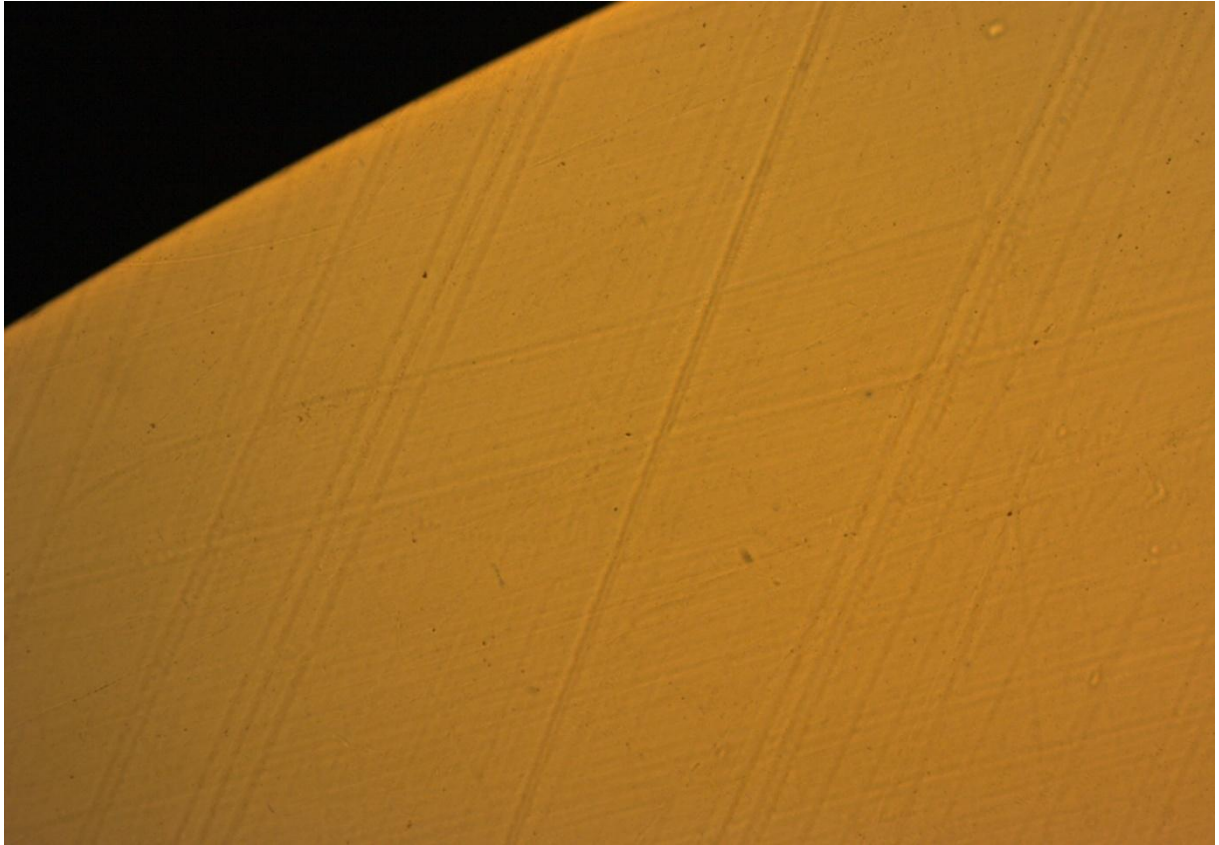
Figur 5.19: Tetthet av vanntær ved indre halvleder ved 40 °C



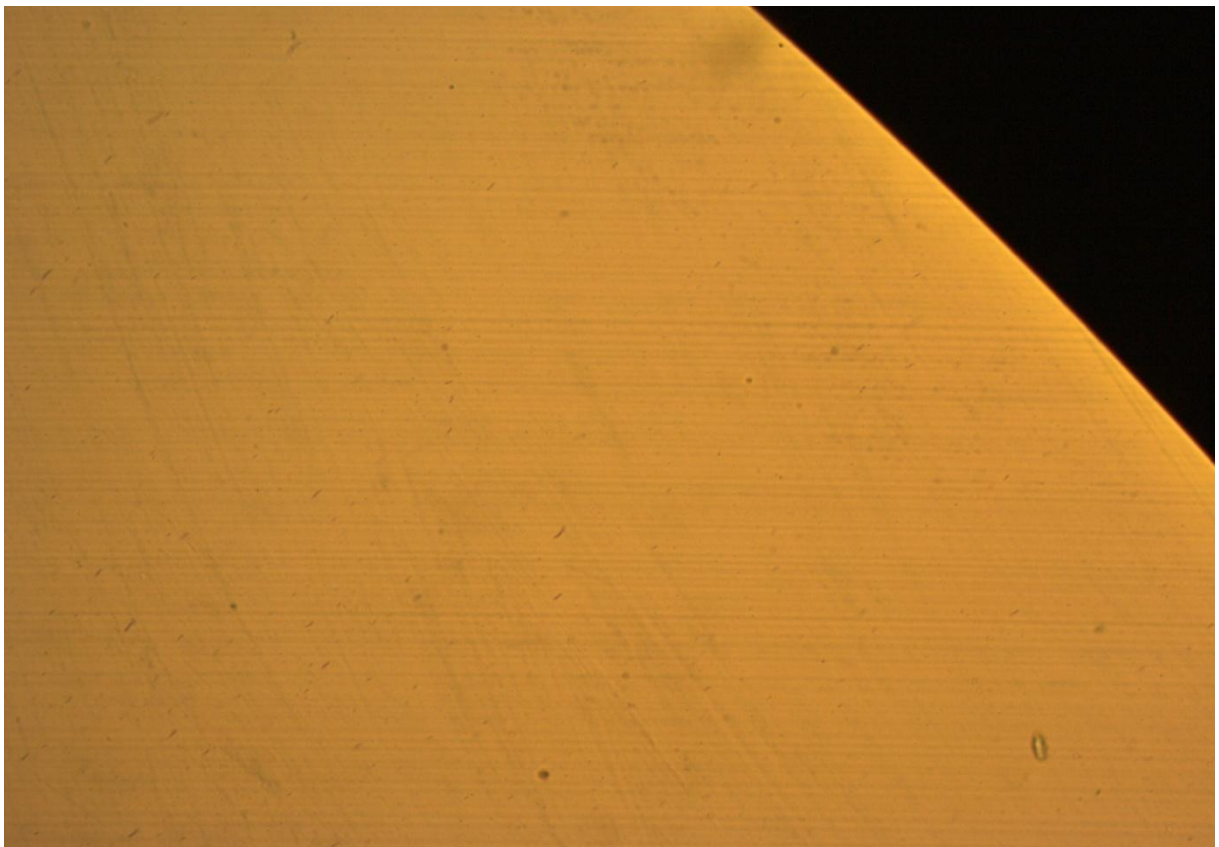
Figur 5.20: Tetthet av vanntrær ved indre halvleder ved andre gjennomkjøring ved 60 °C



Figur 5.21: Tetthet av vanntrær ved indre halvleder ved første gjennomkjøring ved 60 °C

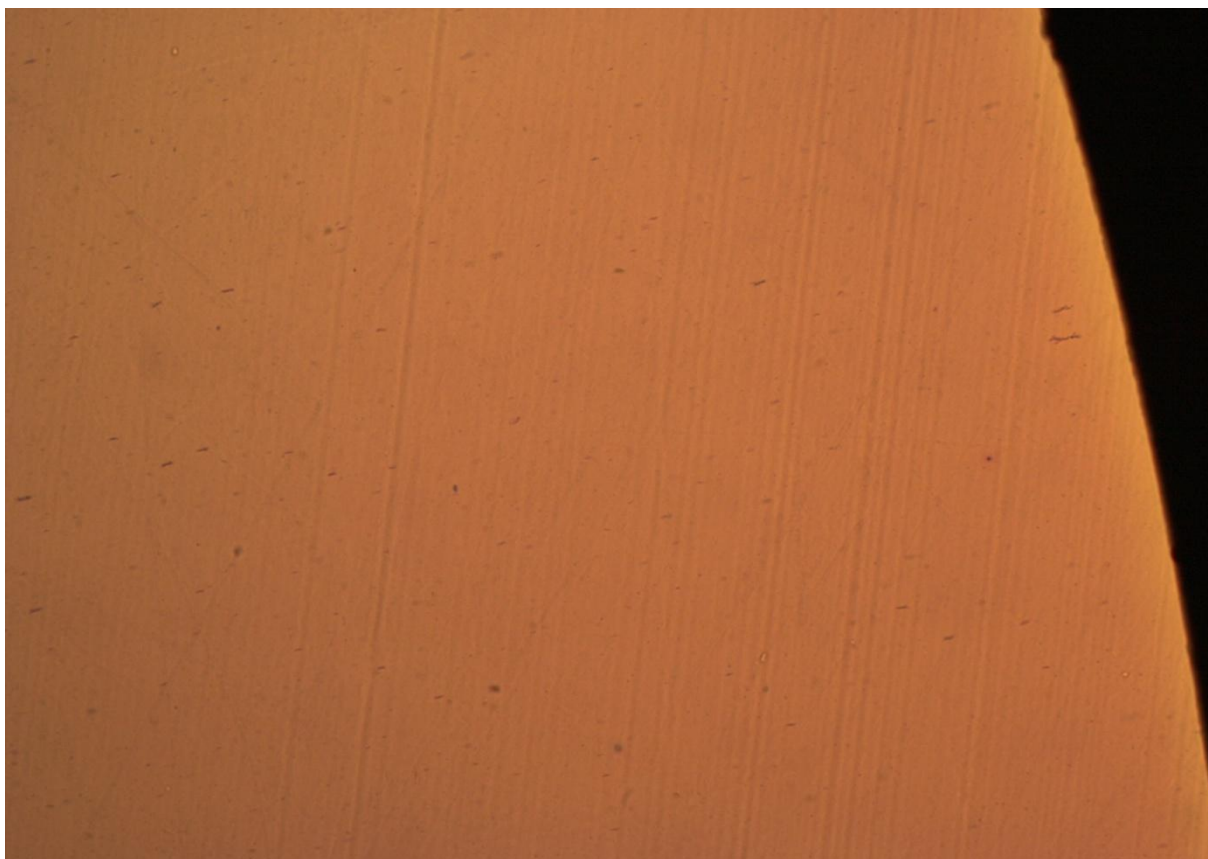


Figur 5.22: Tetthet av vanntrær ved ytre halvleder ved 18 °C

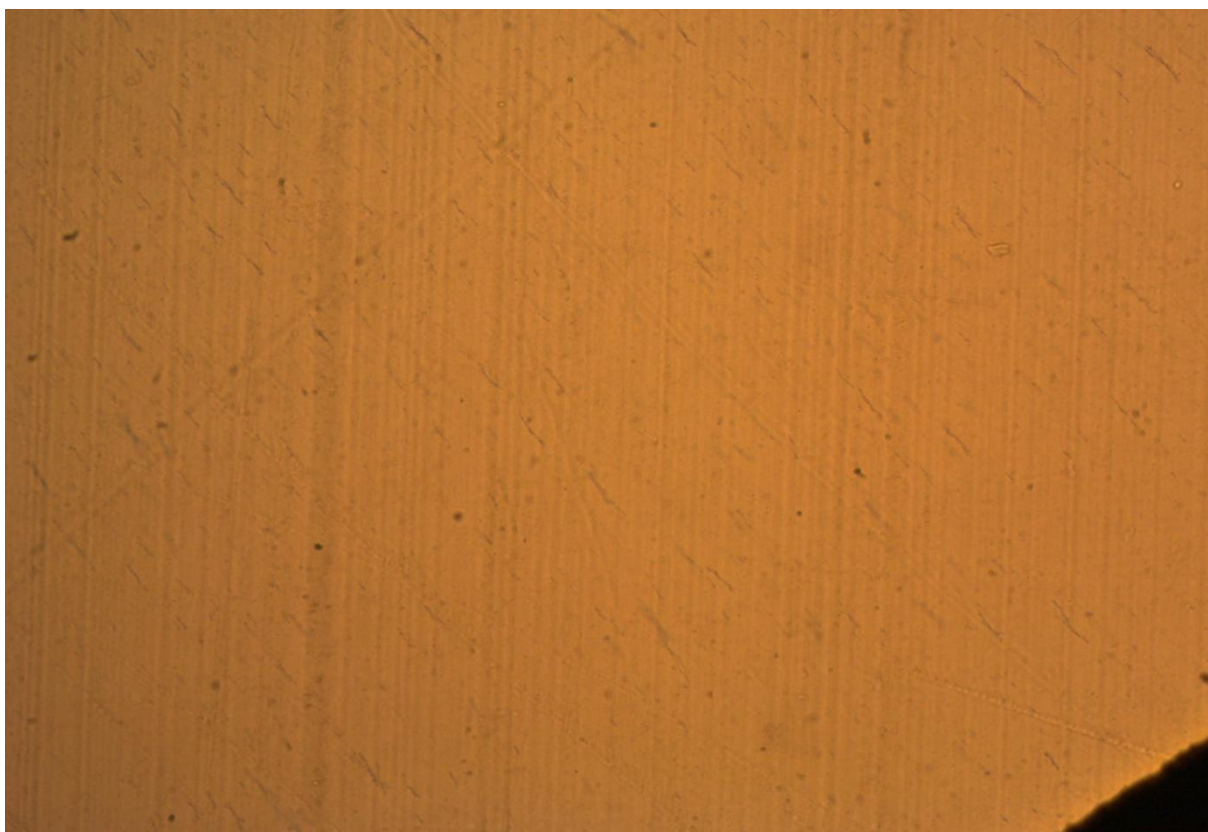


Figur 5.23: Tetthet av vanntrær ved ytre halvleder ved 40 °C





Figur 5.24: Tetthet av vanntrær ved ytre halvleder ved andre gjennomkjøring ved 60 °C



Figur 5.25: Tetthet av vanntrær ved ytre halvleder ved første gjennomkjøring ved 60 °C

### 5.2.7 Ventilerte vanntrær

I løpet av analysen av de til sammen 100 snittene ble det ikke observert mer enn tre ventilerte vanntrær. Dette stemmer godt med tidligere resultater [8]. Samtlige ventilerte vanntrær ble funnet ved den indre halvlederen. Bilder av de tre vanntrærne ligger i vedlegg A.

## 6 Diskusjon

I denne delen av oppgaven blir resultatene analysert og diskutert.

### 6.1 Krympelengde

Resultatene viser at samtlige prøveobjekter krymper i lengde når lederen ble trukket ut. Dette kommer av at når polymerene ekstruderes direkte på kablet, oppstår det en sterk overflatefriksjon mellom lederen og polymerene. Denne friksjonen hindrer senere polymerene i å krympe når den avkjøles. Dette skaper innefryste krefter i lengderetningen, krefter som frigis når lederen fjernes og fører til at hele kabelisolasjonen krymper.

### 6.2 Effekten av temperaturer og mekaniske spenninger på vanntrevekst

#### 6.2.1 Effekten av de to temperaturfallene

Dersom de ulike gjennomkjøringene gjort med prøveobjekter ved 60 °C sammenliknes, er det tydelig at den første gjennomkjøringen som opplevde to temperaturfall, gir for høye tall i sammenliknet med resultatene fra den andre gjennomkjøringen (figur 5.5 og figur 5.14). Dette kommer av at disse tre prøveobjektene opplever overmetning ved temperaturreduksjonene. Det vil si at vannet som har diffundert inn i kablet i løpet av de to første ukene ikke rekker å diffundere ut igjen i løpet av tiden temperaturen faller. Vannet som da ligger i kablet i form av enkle vannmolekyler vil kondensere og, der det er mulig, samle seg i urenheter og hulrom. Disse ansamlingene av vann vil da skape ideelle forhold for videre vanntreinitieringer.

Som resultatene viser, vil dette gi prøveobjekter der det i isolasjonen finnes mange og tette vanntreinitieringer i tillegg til lengre vanntre (figur 5.21 og figur 5.25). Siden forskjellene mellom resultatene fra denne gjennomkjøringen og de andre gjennomkjøringene er så store, i tillegg til at de ulike gjennomkjøringene har blitt utsatt for ulike aldringsforhold, vil en sammenlikning mellom disse resultatene ikke gi informasjon om virkningen av temperaturer og mekaniske spenninger. Det velges derfor kun å se på interne endringer for den første gjennomkjøringen ved 60 °C, og ikke sammenlikne denne gjennomkjøringen med de andre.

Det er viktig å få frem at selv om resultatene fra første gjennomkjøring ikke kan benyttes i sammenlikningen med de andre gjennomkjøringene, er de veldig interessante og skaper ideer for videre forskning.

## 6.2.2 Effekten av mekaniske spenninger på antall vanntrær

### *Prøveobjekter ved 18 °C*

I resultatene fra den andre gjennomkjøringen kom det frem at antallet vanntrær ved 18 °C varierte mye mellom de ulike prøveobjektene. For begge soner viser resultatene at flest trær ble funnet i prøveobjektet uten leder, med strekk (figur 5.1). Dette er naturlig da dette prøveobjektet opplever mer strekk enn de andre prøveobjektene.

I prøveobjektet med leder, uten strekk ble det funnet at flest vanntrær initieres ved den ytre halvlederen, men at forskjellen i antall er veldig liten. Dette skiller seg fra de andre to prøveobjektene der flest vanntrær initieres ved den indre halvlederen, og der forskjellene mellom ytre og indre halvleder er større. For de to sistnevnte prøveobjektene stemmer disse resultatene med hypotesen og tidligere funn. Årsaken til at flest vanntrær initieres ved den indre halvlederen er at her er effekten av de innefryste kreftene sterkest, og det elektriske feltet størst.

Det er interessant å se at selv om lederen i disse prøveobjektene er fjernet, er antallet vanntrær ved den indre halvlederen større. Dette er naturlig for prøveobjektet som strekkes, men for prøveobjektet uten strekk strider dette mot antagelsen om at deler av de innefryste kreftene reduseres når lederen fjernes. Det antas derfor at de innefryste kreftene ikke reduseres i noen signifikant grad når lederen fjernes ved 18 °C.

Dersom antallet vanntrær ved indre halvleder mellom prøveobjektet med leder, uten strekk og prøveobjektet uten leder, uten strekk sammenliknes, kommer det frem at antallet er signifikant lavere i prøveobjektet med leder. Her antas det at det lave tallet vanntrær er forårsaket av den reduserte diffusjonsflaten ved den indre halvlederen. Det vil si at lederen i prøveobjektet med leder reduserer arealet som kommer i kontakt med vann, og fører til en vanskeligere diffusjon av vann.

Ved å se på figur 5.2 kan effekten av de mekaniske spenningene undersøkes. Her kommer det tydelig frem at de mekaniske spenningene som påføres prøveobjektet uten leder, men med strekk gir signifikante endringer i antallet vanntrær. Det kommer også tydelig frem at en inntakt leder gir store utslag i antallet vanntrær ved den indre halvlederen. De andre endringene i mekanisk spenning er også signifikante, men ikke i like stor grad.

### *Prøveobjekter ved 40 °C*

Resultatene i gjennomkjøringen ved 40 °C viser de samme mønstrene som i gjennomkjøringen ved 18 °C (figur 5.3). Også her er de fleste vanntrærne lokalisert i prøveobjektet uten leder, med strekk, og også her finner vi de fleste vanntrærne ved den indre halvlederen for prøveobjektene uten leder.

Denne gjennomkjøringen skiller seg fra gjennomkjøringen ved 18 °C med det at forskjellen i antallet vanntrær mellom de ulike prøveobjektene ikke er like tydelig. Dette kommer tydelig frem i figuren som viser standardavvik (figur 5.4). Ved den indre halvlederen overlapper verdiene til prøveobjektet med leder, uten strekk og verdiene til prøveobjektet uten leder, uten strekk. Ved den ytre halvlederen overlapper verdiene til prøveobjektet med leder, uten strekk og verdiene til prøveobjektet uten leder, med strekk. Dette viser at effekten av de mekaniske spenningene reduseres, og at diffusjonen av vann skjer raskere ved økende temperaturer.

### *Prøveobjekter ved 60 °C*

Denne delen av diskusjonen er spesiell da det ikke er mulig å sammenligne den første gjennomkjøringen ved 60 °C med de andre gjennomkjøringene, og siden effekten av de mekaniske spenningene ikke vises i det enslige prøveobjektet i andre gjennomkjøringen ved 60 °C.

I den første gjennomkjøringen kommer det frem at samtlige endringer i mekaniske spenninger ikke gir signifikante endringer i sluttresultatene (figur 5.7). Dette er tydelig siden samtlige standardavvik overlapper hverandre, både ved den ytre og den indre halvlederen. Det er da mulig å tolke resultatene i den retning at temperaturøkningen har ført til at de fleste innefryste kreftene er frigjort og ikke lenger påvirker antallet vannreinitieringer.

Dersom den andre gjennomkjøringen ved 60 °C inkluderes i diskusjonen, kommer det frem av de observasjonene som ble gjort, at tettheten av vanntrær øker med temperaturen. Dette er spesielt synlig ved den indre halvlederen der tettheten øker signifikant fra 18 °C til 40 °C (figur 5.20 og figur 5.21). Tettheten øker også i overgangen til 60 °C, men denne endringen er ikke like synlig (figur 5.22). På bekostning av tettheten, reduseres lengden av de fleste vanntrærne, og mange av vanntrærne havner dermed under den lengden som er satt for å telle med i resultatene. Dersom alle trærne hadde blitt telt, ville de fleste trærne blitt funnet ved den indre halvlederen.

I observasjonene fra den første gjennomkjøringen ved 60 °C, kommer det frem at tettheten av vanntrær ved begge halvlederne øker mye i tillegg til at de fleste vanntrærne øker i lengde (figur 5.23 og 5.27). Dette kommer av overmetningen som skjedde ved temperaturfallene. Siden antallet vanntrær i den første gjennomkjøringen var så høyt, ble det bestemt å gjennomføre en mer overfladisk telling. Dette kan ha ført til at trær som ligger i området rundt 30 µm, har blitt telt feil. Mindre trær kan ha blitt telt som store, og store trær kan ha blitt telt som små. Dette medfører stor variasjon i antallet vanntrær imellom snittene, som gir store standardavvik. Det antas at de store variasjonene i figur 5.6, skyldes denne overfladiske tellingen.

### 6.2.3 Effekten av temperaturer på antall vanntær

I denne delen av diskusjonen er resultatene vinklet slik at effekten av de ulike temperaturene lettere kan fremstilles og sammenliknes. Resultater ved 60 °C er kun gitt for prøveobjektet med leder, uten strekk.

#### *Prøveobjekt med leder, uten strekk*

I figur 5.8 og figur 5.9 kommer det tydelig frem at overgangen fra 18 °C til 40 °C gir signifikante endringer i antallet vanntær både ved den ytre og den indre halvlederen. Endringene fortsetter å være signifikante ved den ytre halvlederen i overgangen fra 40 °C til 60 °C, mens endringene ved den indre halvlederen ikke lenger er signifikante. Dette kan tyde på at store deler av de innefryste kompresjonskreftene forsvinner ved høye temperaturer, og at dette i kombinasjon med økende diffundering av vann ved ytre halvleder fører til økende antall vanntær.

Det antas at effekten av relaxeringen av de innefryste strekkreftene hindres i noe grad av lederen, og at dette fører til at mange trær initieres ved den indre halvlederen. Samtidig hindrer lederen nok vann i å diffundere inn i isolasjonen. Samlet gir dette mange korte trær, trær som ikke telles med i resultatene.

#### *Prøveobjekt uten leder, med strekk*

I figur 5.10 og figur 5.11 fremstilles resultatene fra prøveobjektet uten leder, med strekk. Resultatene viser at antallet vanntær reduseres ved begge halvledere når temperaturen øker. Dette kommer i hovedsak av relaxeringen av de samlede mekaniske spenningene som følge av temperaturøkningen og økningen av viskositet i isolasjonen. I figur 5.11 overlapper de ulike standardavvikene, noe som tyder på at effekten av temperaturøkningen ikke gir signifikante endringer i sluttresultatene.

#### *Prøveobjekt uten leder, uten strekk*

I figur 5.12 fremstilles resultatene av temperaturforskjeller i prøveobjektene uten leder, med strekk. Det kommer her frem at antallet vanntær øker ved begge halvledere når temperaturen øker, men resultatene i figur 5.13 viser at endringene som skjer ved den indre halvlederen, ikke gir signifikante endringer på antall vanntær. Ved den indre halvlederen er det ved 18 °C i dette tilfellet konstant tilførsel av vann, som gjør at antall trær her er signifikant større enn ved prøveobjektet med leder, uten strekk. En kombinasjon av økende diffundering av vann sammen med reduksjoner av de innefryste kreftene, fører til at endringen ved den indre halvlederen ikke er signifikante, da disse faktorene motvirker hverandre. Ved den ytre halvlederen vil disse faktorene virke sammen og øke antallet vanntær.

### 6.2.3 Effekten av temperaturer og mekaniske spenninger på trelengden

Også i denne delen av diskusjonen kommer det tydelig frem at resultatene fra den første gjennomkjøringen av prøveobjekter ved 60 °C er mye høyere enn resultatene fra de andre gjennomkjøringene (figur 5.16). Da denne gjennomkjøringen ble utsatt for andre forhold i aldringsperioden velges det også her å se bort fra disse resultatene når det skal gjennomføres en sammenlikning.

Ved å studere figur 5.16 og 5.17 kommer det tydelig frem at samtlige standardavvik krysser hverandre, og at ingen endringer som utføres i temperatur eller mekanisk spenning vil gi signifikante endringer på gjennomsnittlig maksimal vanntrelengde.

Det ble underveis observert at de trærne som gav størst utslag på gjennomsnittlig maksimal trelengde ofte hadde sine initieringspunkt i store forurensninger eller store hulrom. Dette er et tegn på at gjennomsnittlig maksimal trelengde i større grad er avhengig av initieringspunkt enn av endringer i temperaturer eller mekaniske spenninger. Bilder av de største maksimale vanntreer ligger i vedlegg A.

### 6.3 Ventilerte vanntrær

Det at det kun ble registrert tre ventilerte vanntrær av betydelig størrelse er et forventet resultat. Dette kommer mest sannsynlig av at aldringstiden er for kort til at ventilerte vanntrær rekker å vokse seg store nok. De ventilerte vanntrærne som ble registrert, hadde alle sitt initieringspunkt på den indre halvlederen, der det elektriske feltet er størst.

### 6.4 Feilkilder

Noen faktorer som kan ha virket inn på sluttresultatene i denne oppgaven er:

- *Unøyaktig produksjon av festepunkt.* Dersom festepunktene ikke ble festet nøyaktig 100 cm fra hverandre, vil strekket variere noe mellom prøveobjektene uten leder, med strekk.
- *Høyere temperatur i vannet enn ved målenoden.* Dersom forskjellen mellom temperaturen utenpå vannrøret, der målenodene ble plassert, og vannet på innsiden er signifikant, vil de tempererte kablene ha blitt utsatt for høyere temperatur enn beregnet.
- *Overfladisk måling av antall vanntrær.* I analysen av prøveobjektene fra den første gjennomkjøringen ved 60 °C ble det bestemt kun å telle antallet vanntrær overfladisk, da antallet trær over 30 µm var for høyt.

## 7 Konklusjon

I denne oppgaven ble det funnet at antallet vanntrær i en PEX-isolert høyspentkabel er sterkt avhengige av de mekanisk påtrykte spenningene ved lave temperaturer, men at effekten av spenningene reduseres når temperaturen økes. Spesielt effekten ekstra strekk påfører kabelen reduseres kraftig når temperaturen øker. Dette kommer av at isolasjonen da blir mer viskøs og de innefryste kreftene relaxeres.

I tillegg ble det observert at økende temperaturer førte til at tettheten av vanntrær økte i samtlige prøveobjekter. På bekostning av denne økningen i tetthet ble lengden på vanntrærne kortere. Dette kommer av at isolasjonen blir mer viskøs og tar opp mer vann ved høyere temperaturer.

Det ble også funnet at ledere hindrer deler av diffusjonen av vann inn til isolasjonen ved den indre halvlederen.

I resultatene fra gjennomsnittlig maksimalt lengste vanntrær kom det frem at lengden til et vanntrær i en PEX-isolert høyspentkabel er sterkt avhengig av forurensinger i isolasjonen, og i stor grad uavhengig av både endringer i temperatur og mekaniske spenninger.

Til slutt ble det funnet at under disse forholdene er en testperiode på tre uker for kort til at store mengder ventilerte vanntrær initierer.

## 8 Forslag til videre arbeid

I denne oppgaven skjedde det to temperaturfall som fikk store innvirkninger på både antallet vanntrær og lengden av vanntrær. Da disse, forholdsvis korte, temperaturendringene gav slike store endringer i sluttresultatet, kan det videre være veldig interessant å undersøke effekten av overmetning ved ulike temperaturer. I denne sammenhengen vil både tid og temperatur være interessante faktorer å undersøke. I tillegg vil det være interessant å se på diffusjonshastigheten ved de ulike temperaturene.

Det er også fornuftig å undersøke effekten av temperaturer og mekaniske spenninger videre, men med en forlenget aldringsperiode. På denne måten vil forhåpentlig effektene av disse endringene bli enda tydeligere, i tillegg til at veksten av ventilerte vanntrær da kan undersøkes. Samtidig er det anbefalt å øke antall temperaturer som undersøkes, for lettere å se mønster på tvers av mekaniske spenninger.



## Referanseliste

- [1] Erling Ildstad, *TET4195 High Voltage Equipment, CABLE TECHNOLOGY*,  
NTNU, notater: 2009, forelesning: 2014
- [2] Simon Årdal Aarseth, *Virkning av mekanisk spenning på vanntrevekst i PEX isolerte høyspentkabler*, NTNU, 2013
- [3] E. Ildstad, T. A. Lindseth, H. Faremo, *Water Treeing of XLPE Cables during Dynamic Mechanical Tension*, IEEE, 2012
- [4] E. Ildstad, H. Bårdsen, H. Faremo, B. Knutsen, *Influence of Mechanical Stress and Frequency on Water Treeing in XLPE Cable Insulation*, IEEE, 1990
- [5] E. Ildstad, S. Å. Aarseth, H. Faremo, *Enhancement of Water Tree Initiation Due to Residual and Applied Mechanical Strain on XLPE Cables*, NTNU, 2013
- [6] S. Nordås, E. Ildstad, *The Influence of Strain on Water Treeing in XLPE Power Cables*,  
IEEE, 2010
- [7] E. Ildstad, H. Faremo, *Effect of Dynamic Mechanical Load on Water Treeing of XLPE Cables*,  
NTNU, 2013
- [8] Kurt-A. G. Plassen, *Virkningen av temperaturer på vanntrevekst i PEX-isolerte høyspentkabler*,  
NTNU, 2014
- [9] Erling Ildstad, *TET4160 High Voltage Insulation Materials*,  
NTNU, bok: 2012, forelesning: 2013
- [10] General Cable, *Aging of XLPE Compounds*, General Cable, Australia, 2013
- [11] Erling Ildstad, *ELK30 Condition Assessment og High Voltage Apparatus*,  
NTNU, notater: 1998, forelesning: 2013
- [12] S. Hvidsten, E. Ildstad, H. Faremo, *Mechanisms Causing Nonlinear Dielectric Response of Water Treed XLPE Cables*, IEEE, 1997
- [13] S. Hvidsten, E. Ildstad, J. Sletbak, H. Faremo, *Understanding Water Treeing Mechanisms in the Development of Diagnostic Test Methods*, IEEE, 1998
- [14] E. Ildstad, J. Sletbak, H. Faremo, *Water Treeing and Breakdown strength Reduction of XLPE Insulation*, ICS, juli 1989

- [15] Line Helland, *Romladningsdistribusjon i XLPE HVDC kabelisolasjon for flytende vindturbiner*, NTNU, 2013
- [16] M. H. Shwedhi, M. A. Morsy, A. Abugurian, *Thermal Aging Tests on XLPE and PVC Cable Insulation Materials of Saudi Arabia*, IEEE, 2003
- [17] Dr.-ing. Dietmar Meurer, *12WS-02618 Power Cable Engineering*, RWTH, notater: 2012, forelesning: 2012
- [18] SINTEF v. Hallvard Faremo, *Innfarging av PEX isolasjon mht vanntrevekst*, SINTEF, 2014

## Vedlegg

### Vedlegg A: Bilder av vanntrær

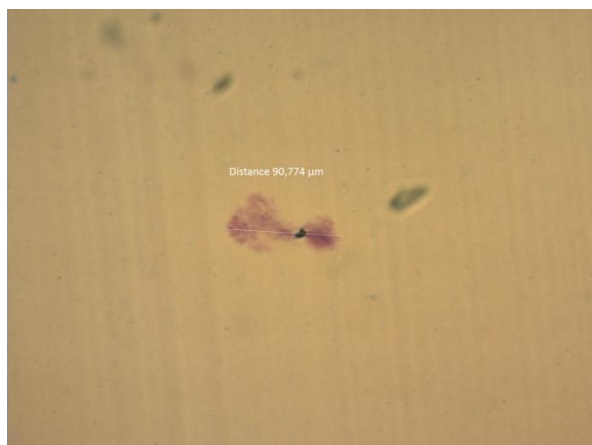
Under vises bilder av det største vantreet i hvert prøveobjekt. På bildene kommer det frem at mange av vanntrærne har sine initieringspunkt i store forurensninger eller hulrom.



Figur A.1: Det største vantreet i prøveobjektet med leder, uten strekk ved 18 °C

Lengde: 77,172  $\mu\text{m}$

Navn: rom ms nr. 4



Figur A.2: Det største vantreet i prøveobjektet uten leder, med strekk ved 18 °C

Lengde: 90,774  $\mu\text{m}$

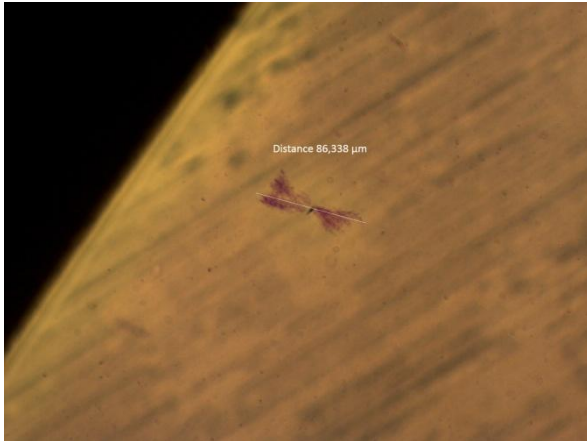
Navn: rom ms nr. 1



Figur A.3: Det største vantreet i prøveobjektet uten leder, uten strekk ved 18 °C

Lengde: 87,745  $\mu\text{m}$

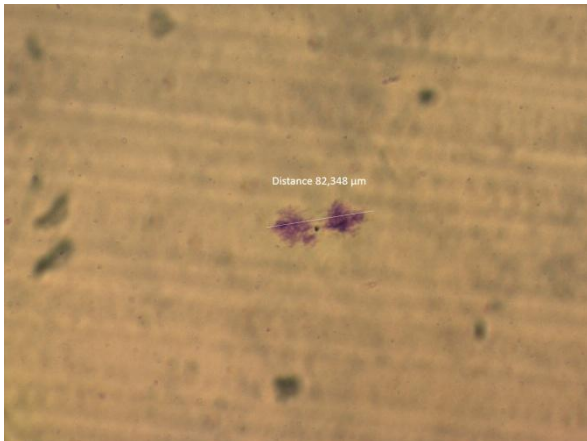
Navn: rom us nr. 9



Figur A.4: Det største vanntreet i prøveobjektet med leder, uten strekk ved 40 °C

Lengde: 86,338 μm

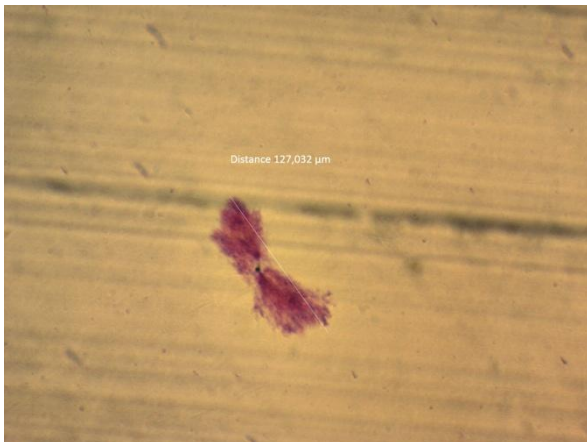
Navn: 40 ml nr. 5



Figur A.5: Det største vanntreet i prøveobjektet uten leder, med strekk ved 40 °C

Lengde: 82,348 μm

Navn: 40 ms nr. 1



Figur A.6: Det største vanntreet i prøveobjektet uten leder, uten strekk ved 40 °C

Lengde: 127,032 μm

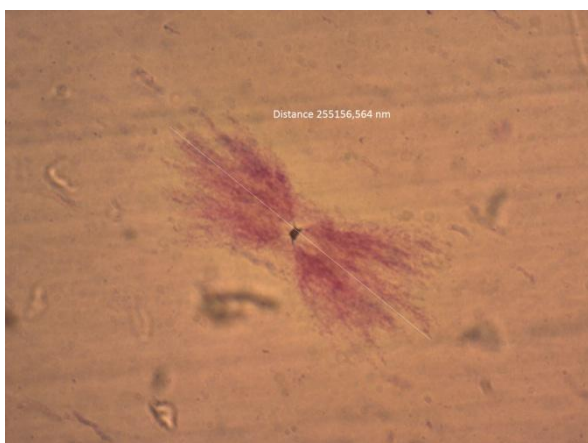
Navn: 40 us nr. 9



Figur A.7: Det største vanntreet i prøveobjektet med leder, uten strekk ved første gjennomkjøring av 60 °C

Lengde: 174,429 μm

Navn: 1.60 ml nr. 9



Figur A.8: Det største vanttreet i prøveobjektet uten leder, med strekk ved første gjennomkjøring av 60 °C

Lengde: 255, 157  $\mu\text{m}$

Navn: 1.60 ms nr. 10



Figur A.9: Det største vanttreet i prøveobjektet uten leder, uten strekk ved første gjennomkjøring av 60 °C

Lengde: 182,668  $\mu\text{m}$

Navn: 1.60 us nr. 5

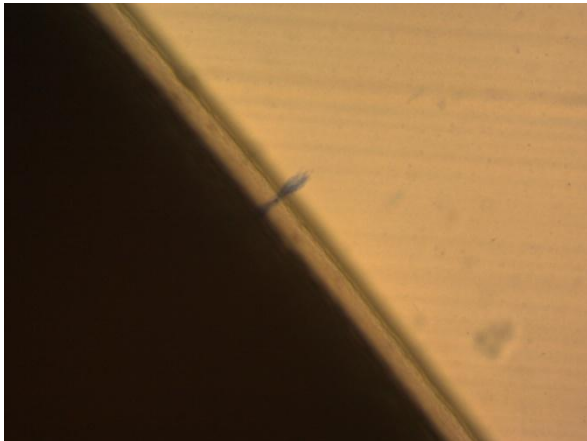


Figur A.10: Det største vanttreet i prøveobjektet med leder, uten strekk ved andre gjennomkjøring av 60 °C

Lengde: 96,416  $\mu\text{m}$

Navn: 2.60 ml nr. 3

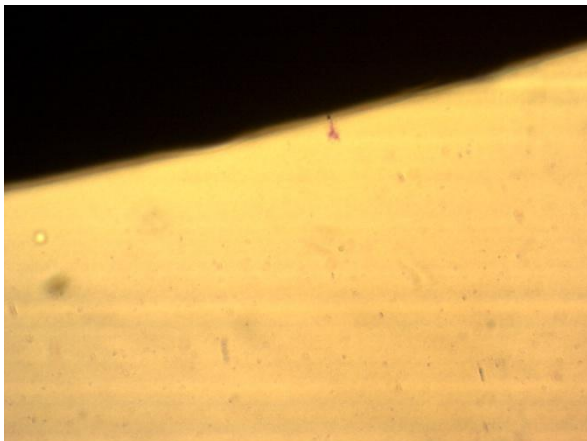
Under blir bildene av de ventilerte trærne som ble funnet vist frem. Dette viser at antallet ventilerte vanntrær av signifikant størrelse var veldig få.



Figur A.11: Et av de få ventilerte vanntrærne funnet i denne oppgaven. Treet ble funnet ved den indre halvlederen i prøveobjektet uten leder, med strekk ved 18 °C.



Figur A.12: Et av de få ventilerte vanntrærne funnet i denne oppgaven. Treet ble funnet ved den indre halvlederen i prøveobjektet med leder, uten strekk ved 40 °C.



Figur A.13: Et av de få ventilerte vanntrærne funnet i denne oppgaven. Treet ble funnet ved den indre halvlederen i prøveobjektet uten leder, uten strekk ved 40 °C.

## Vedlegg B: Elektrisk feltfordeling i kabler

Ved å ta i bruk formel (3), beregnes den maksimale feltstyrken ved indre halvleder. Dette vil, med en radius på,  $r = r_i = 5,7\text{mm}$ , gi:

$$E_{max}(r) = \frac{U}{r_i \ln \frac{r_y}{r_i}} = \frac{13,09 \text{ kV}}{5,7\text{mm} \ln \frac{10,4\text{mm}}{5,7\text{mm}}} = 3,8 \frac{\text{kV}}{\text{mm}}$$

Med den samme formelen men med å bruke  $r = r_y = 10,4\text{mm}$  beregnes den minimale feltstyrken:

$$E_{min}(r) = \frac{U}{r_y \ln \frac{r_y}{r_i}} = \frac{13,09 \text{ kV}}{10,4\text{mm} \ln \frac{10,4\text{mm}}{5,7\text{mm}}} = 2,1 \frac{\text{kV}}{\text{mm}}$$

Ved å bruke formel (4) beregnes den gjennomsnittlige feltstyrken over hele isolasjonen til å bli:

$$E_{gjennomsnitt} = \frac{U}{r_y - r_i} = \frac{13,09 \text{ kV}}{10,4\text{mm} - 5,7\text{mm}} = 2,79 \frac{\text{kV}}{\text{mm}}$$

## Vedlegg C: Volumberegninger

Ved å ta i bruk formel (8), (9) og (10), beregnes de tre volumene. Her benyttes disse verdiene:

- Synsfeltets diameter	=	$D_{\text{syns}}$	=	1	mm
- Ytre diameter	=	$D_{\text{ytre}}$	=	20,8	mm
- Ytre radius	=	$R_{\text{ytre}}$	=	10,4	mm
- Indre diameter	=	$D_{\text{indre}}$	=	11,4	mm
- Indre radius	=	$R_{\text{indre}}$	=	5,7	mm
- Snittykkelse	=	$t_{\text{snitt}}$	=	0,25	mm

$$V_{ytre} = \pi \cdot 0,25 \text{ mm} \cdot (10,4 \text{ mm}^2 - (10,4 \text{ mm} - 1 \text{ mm})^2) = \pi \cdot \frac{99}{20} \text{ mm}^3 = 15,55088364 \text{ mm}^3$$

$$V_{indre} = \pi \cdot 0,25 \text{ mm} \cdot ((5,7 \text{ mm} + 1 \text{ mm})^2 - 5,7 \text{ mm}^2) = \pi \cdot \frac{31}{10} \text{ mm}^3 = 9,738937226 \text{ mm}^3$$

$$V_{totalt} = \pi \cdot 0,25 \text{ mm} \cdot (10,4 \text{ mm}^2 - 5,7 \text{ mm}^2) = \pi \cdot \frac{7567}{400} \text{ mm}^3 = 59,43107902 \text{ mm}^3$$

## Vedlegg D: Temperaturfall

Den 8. november 2014, litt over en uke etter oppstart, ble den tredje gjennomkjøringen avbrutt av et lite temperaturfall som følge av en liten vannlekkasje. Forløpet gikk som tabellen under viser:

Dato	Tid	Ch1	Ch2	Ch3	Ch4	Ch5
08.11.2014	1201	62,79	60,163	60,506	60,53	17,727
	1206	62,78	60,165	60,504	60,374	17,708
	1211	62,79	60,155	60,484	60,377	18,033
	1216	62,768	60,088	60,499	60,498	17,722
	1221	62,768	60,158	60,489	60,476	17,66
	1226	62,751	60,085	60,471	60,511	17,928
	1231	62,717	60,047	60,449	60,533	17,845
	1236	62,707	60,047	60,454	60,454	17,676
	1241	62,688	60,078	60,457	60,45	18,115
	1246	61,422	59,206	59,608	59,561	17,7
	1251	60,264	58,148	58,532	58,592	17,722
	1256	59,161	57,151	57,456	57,402	17,625
	1301	58,097	56,149	56,457	56,452	17,521
	1306	57,128	55,2	55,51	55,512	17,914
	1311	56,198	54,27	54,615	54,645	17,756
	1316	55,298	53,433	53,81	53,82	17,869
	1321	54,481	52,586	52,995	53,015	17,616
	1326	53,641	51,849	52,193	52,228	17,62
	1331	52,821	51,129	51,394	51,335	17,641
	1336	52,082	50,447	50,811	50,633	17,647
	1341	51,365	49,738	50,241	50,033	17,601
	1346	50,651	49,028	49,828	49,288	17,872
	1351	50,039	48,44	50,207	48,735	17,449
	1356	49,382	47,815	49,714	48,067	17,914
	1401	51,431	48,086	49,659	48,239	17,626
	1406	58,133	53,988	54,673	53,897	17,848
	1411	62,57	59,128	60,665	59,349	17,897
	1416	62,773	59,84	62,001	60,292	17,877
	1421	62,823	60,061	62,311	60,374	17,604
	1426	62,993	60,241	62,485	60,562	17,581
	1431	62,939	60,316	62,568	60,521	17,797

Tabell D.1: Verdier benyttet i fremstillingen av temperaturfallet 08.11.2014



Den samme gjennomkjøringen ble nok en gang avbrutt tre dager senere, nesten to uker ut i tredje gjennomkjøring. Denne gangen var det en alvorlig vannlekkasje som varte over flere timer. Forløpet gikk som tabellen under viser:

Dato	Tid					
		Ch1	Ch2	Ch3	Ch4	Ch5
11.11.2014	551	63,063	60,318	60,956	60,656	17,57
	556	63,049	60,347	60,924	60,638	17,873
	601	63,002	60,356	60,871	60,596	17,498
	606	63,014	60,323	60,92	60,618	17,561
	611	63,072	60,389	60,946	60,667	17,786
	616	63,067	60,426	60,968	60,749	18,006
	621	63,004	60,317	60,903	60,69	18,062
	626	63,042	60,319	60,954	60,756	18,09
	631	63,059	60,4	60,974	60,669	17,924
	636	63,069	60,36	60,935	60,691	17,849
	641	63,067	60,474	60,963	60,779	18,475
	646	62,992	60,255	60,895	60,734	17,913
	651	63,062	60,381	60,963	60,721	17,928
	656	63,028	60,403	60,935	60,582	17,799
	701	62,989	60,355	60,913	60,593	18,013
	706	62,218	59,907	60,534	60,29	17,81
	711	61,015	58,804	59,47	59,209	17,708
	716	59,867	57,711	58,444	58,078	17,647
	721	58,816	56,746	57,477	57,052	17,909
	726	57,672	55,577	56,433	55,942	17,723
	731	56,757	54,818	55,563	55,062	18,153
	736	55,847	53,933	54,681	54,204	18,384
	741	55,044	53,152	53,877	53,401	18,041
	746	54,264	52,412	53,162	52,653	17,732
	751	53,344	51,56	52,247	51,873	16,349
	756	52,634	50,861	51,505	51,172	17,814
	801	51,838	50,057	50,734	50,476	17,996
	806	51,165	49,429	50,059	49,811	18,086
	811	50,461	48,832	49,409	49,181	18,052
	816	49,86	48,175	48,793	48,658	17,565
	821	49,24	47,595	48,201	48,108	17,858
	826	48,651	47,03	47,675	47,457	17,475
	831	48,061	46,557	47,222	47,004	17,634
	836	47,397	45,902	47,101	46,551	17,812
	841	46,878	45,477	46,996	46,017	17,611
	846	46,299	44,86	46,483	45,205	17,956
	851	45,699	43,949	45,974	44,575	17,563
	856	45,051	43,112	45,392	43,944	17,583

	906	44,562	42,542	44,909	43,391	17,597
	911	43,892	41,743	44,29	42,562	18,158
	916	43,341	41,091	43,78	41,846	17,708
	921	42,837	40,425	43,297	41,185	17,607
	926	42,312	39,782	42,77	40,429	17,576
	931	41,815	39,99	42,336	39,707	17,905
	936	41,148	39,615	42,053	39,194	18,222
	941	40,392	39,138	41,713	38,554	17,757
	946	39,775	38,864	41,312	37,916	17,535
	951	39,201	38,356	40,908	37,251	18,14
	956	38,703	37,739	40,482	36,672	18,094
	1001	38,249	37,039	39,969	36,023	18,333
	1006	37,865	36,298	39,385	35,43	18,097
	1011	37,492	35,508	38,791	34,945	18,089
	1016	37,165	34,931	38,292	34,351	18,229
	1021	36,772	34,405	37,774	33,672	18,162
	1026	36,37	33,915	37,173	33,156	18,139
	1031	34,91	33,558	36,6	32,608	17,813
	1036	34,405	33,261	36,074	32,112	16,778
	1041	34,806	32,959	35,577	31,642	16,231
	1046	34,223	32,695	35,152	31,176	15,605
	1051	33,512	32,217	34,68	30,596	15,63
	1056	32,792	31,832	34,294	30,155	16,003
	1101	31,915	31,464	33,95	29,608	15,735
	1106	30,818	30,98	33,542	29,153	15,775
	1111	29,471	30,493	33,108	28,556	15,623
	1116	28,49	30,78	32,836	28,148	15,845
	1121	27,487	30,21	32,439	27,634	16,089
	1126	26,571	29,827	32,151	27,309	17,44
	1131	25,773	29,359	31,79	26,899	17,332
	1136	24,987	28,944	31,44	26,595	17,587
	1141	24,23	28,591	31,102	26,197	17,639
	1146	23,795	28,34	30,834	25,822	17,838
	1151	23,215	28,017	30,538	25,583	17,596
	1156	22,64	27,736	30,195	25,289	17,657
	1201	22,201	27,521	29,934	25,048	17,698
	1206	21,849	27,342	29,692	24,803	17,789
	1211	21,504	27,137	29,415	24,47	17,773
	1216	21,202	26,876	29,176	24,222	18,145
	1221	20,84	26,673	28,874	23,996	17,738
	1226	20,631	26,517	28,707	23,784	17,855
	1231	20,483	26,237	28,412	23,351	17,82
	1236	20,287	26,11	28,232	23,218	18,114
	1241	19,952	25,837	27,929	22,97	18,063
	1246	19,852	25,726	27,788	22,896	18,204

	1251	19,582	25,474	27,475	22,618	17,66
	1256	19,441	25,343	27,302	22,397	17,824
	1301	19,302	25,067	27,039	22,151	17,989
	1306	19,14	24,92	26,855	22,051	18,127
	1311	19,025	24,704	26,598	21,891	18,33
	1316	18,827	24,519	26,434	21,695	18,108
	1321	18,976	24,444	26,277	21,504	18,251
	1326	18,692	24,203	26,037	21,376	17,896
	1331	39,212	24,052	25,847	21,239	17,912
	1336	47,54	23,832	25,656	21,119	18,281
	1341	51,747	23,658	25,419	20,974	17,855
	1346	54,13	34,181	45,414	24,887	18,045
	1351	59,175	53,405	54,6	38,758	17,172
	1356	63,403	58,349	59,385	56,347	16,093
	1401	63,718	60,51	61,881	59,055	17,466
	1406	63,347	60,611	62,567	58,469	17,742

Tabell D.2: Verdier benyttet i fremstillingen av temperaturfallet 11.11.2014

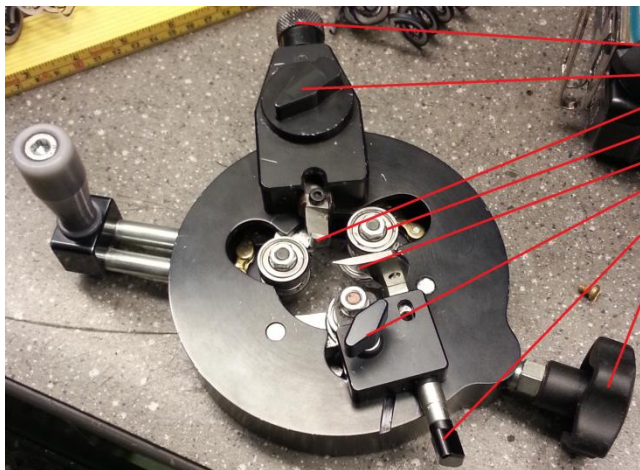
## Vedlegg E: Utstørsbeskrivelse og rørdimensjoner

### Rørdimensjoner:

- Vannrør:	Ytre diameter, $D_y$	=	40,00	mm
	Indre diameter, $D_i$	=	33,00	mm
	Rørtykkelse, $t$	=	3,50	mm
	Lengde, $l$	=	450,00	mm
- Stort stålrør:	Ytre diameter, $D_y$	=	25,00	mm
	Indre diameter, $D_i$	=	22,00	mm
	Rørtykkelse, $t$	=	1,50	mm
	Lengde, $l$	=	100,00	mm
- Lite stålrør:	Ytre diameter, $D_y$	=	10,00	mm
	Indre diameter, $D_i$	=	7,00	mm
	Rørtykkelse, $t$	=	1,50	mm
	Lengde, $l$	=	150,00	mm

### Utstørsbeskrivelse:

#### Kabelskreller

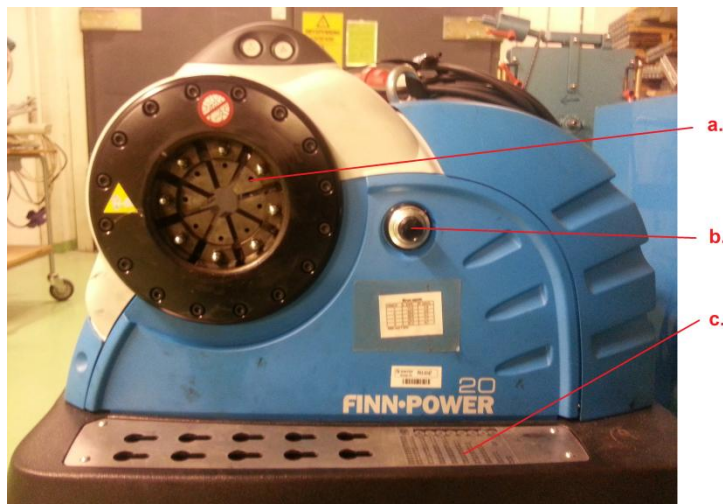


- a. Styring av radius, grov kniv
- b. Styring av vinkel, grov kniv
- c. Grov kniv
- d. Festepunkt, hjul x3
- e. Fin kniv
- f. Styring av vinkel, fin kniv
- g. Styring av radius, fin kniv
- h. Styring av hjul/festepunkt
- i. Hvitt håndtak, skrubevegelse

Figur E.1: Kabelskreller

Kabelskrelleren består av to kniver, en fin (e.) og en grov (c.). Den grove kniven har i oppgave å fjerne all isolasjon helt ned til ledere. Den fine kniven har i oppgave å fjerne den ytre halvlederen og blottlegge isolasjonen. Kabelskrelleren festes ved skru på (h.) slik at (d.) presses mot kabelen. Deretter stilles de to knivene inn slik at de fjerner den ønskelige mengden isolasjon. Når knivene er stilt inn benyttes (i.) til å skru skrelleren med klokken. Denne bevegelsen fjerner isolasjonen samtidig som den beveger seg i kabelens lengderetning.

## Kabelpresse



- a. Presshode
- b. Regulator
- c. Dimensjoner

Figur E.2: Kabelpresse

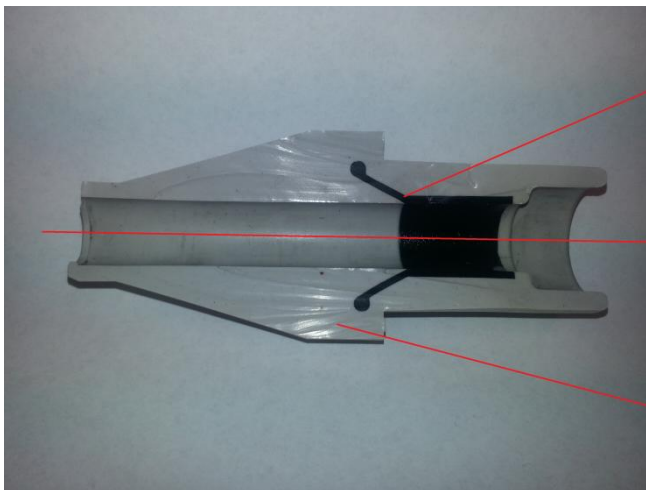
Finn-Power 20 er en kabelpresse der (a.) kan skiftes ut ved behov for å gi korrekt diameter. I tillegg kan hvert presshode justeres ved å skru på (b.). Denne kan justeres til å gi større eller mindre diameter. For å være sikker på at korrekt diameter er valgt, følger det med en plakett, (c.), som beskriver dimensjonene.

Merkeverdier:

Machine type	20MS20	Max working pressure	275 bar
Serial no.	15-20MS-206312	Un	3x 400 V
Manufacturing year	2012	Frequency	50 Hz
Machine weight	157 kg	In	3x 16 A
Swaging force	1370 kN	Motor	3 Kw
		Circuit diagram no.	572132

Tabell E.1: Merkeverdier, kabelpresse

## Stresskone



- a. a. Halvledende elektrode
- b. b. tom ledergang
- c. c. isolerende materiale

Figur E.3: Tverrsnitt av en stresskone

Det er veldig viktig at den halvledende elektroden kommer i kontakt med den ytre halvlederen.

## Varmeelement 1



- a. a. Finjustering av temperatur
- b. b. Faste temperaturer  
Var = varierende temperaturer
- c. c. Lampe som lyser under  
Oppvarming
- d. d. Av/på bryter
- e. e. Lampe som lyser ved feil
- f. f. Temperaturregulering

Figur E.4: Det første varmeelementet som ble benyttet

Dette varmeelementet er av typen julabo V. På releet finner vi bryter (b.) som enten stilles på faste temperaturer eller på Var (regulerbar temperatur). Når den er stilt inn på Var, kan (f.) benyttes til å regulere den ønskede temperaturen. Dersom temperaturen trenger finjustering (mindre enn +/- en grad) benyttes (a.). Mens vannet varmes opp, lyser lampe (c.) Dersom det skulle skje en feil, vil lampe (e.) begynne å lyse. Hele systemet skrur av og på med (d.).

Merkeverdier:

TYP	V/1	NO	8042 022	V	220
DIN	12879/2	W	2050	HZ	50 – 60

Tabell E.2: Merkeverdier, varmeelement

### Vannpumpe



- a. Input, vann fra vanntank
- b. Pumpesystem
- c. Output, vann til kobberfordeling
- d. Kobberfordeling x6

Figur E.5: Vannpumpe

Vannpumpen som er av typen Meeo Tools circulating pump, er en vanlig vannpumpe som har tre innstillinger, som regulerer pumpehastigheten. Pumpen kjører i denne oppgaven konstant på nivå tre.

Merkeverdier:

TYPE	GPD 25-6S	Size	130 mm
NO	10050717	Voltage	230 V
Frequency	50 Hz	Temperature, TF	110 °C
Class	H		

Tabell E.3: Merkeverdier, vannpumpe

Innstillinger:

	P1 (W)	I (A)
III	100	0,45
II	70	0,35
I	55	0,25

Tabell E.4: Innstillinger, vannpumpe

## Temperaturmålere og loggesystem



- a. temperaturlogger
- b. grafisk fremstilling på dataprogram
- c. datamaskin

Figur E.6: Temperaturmålere og loggesystem

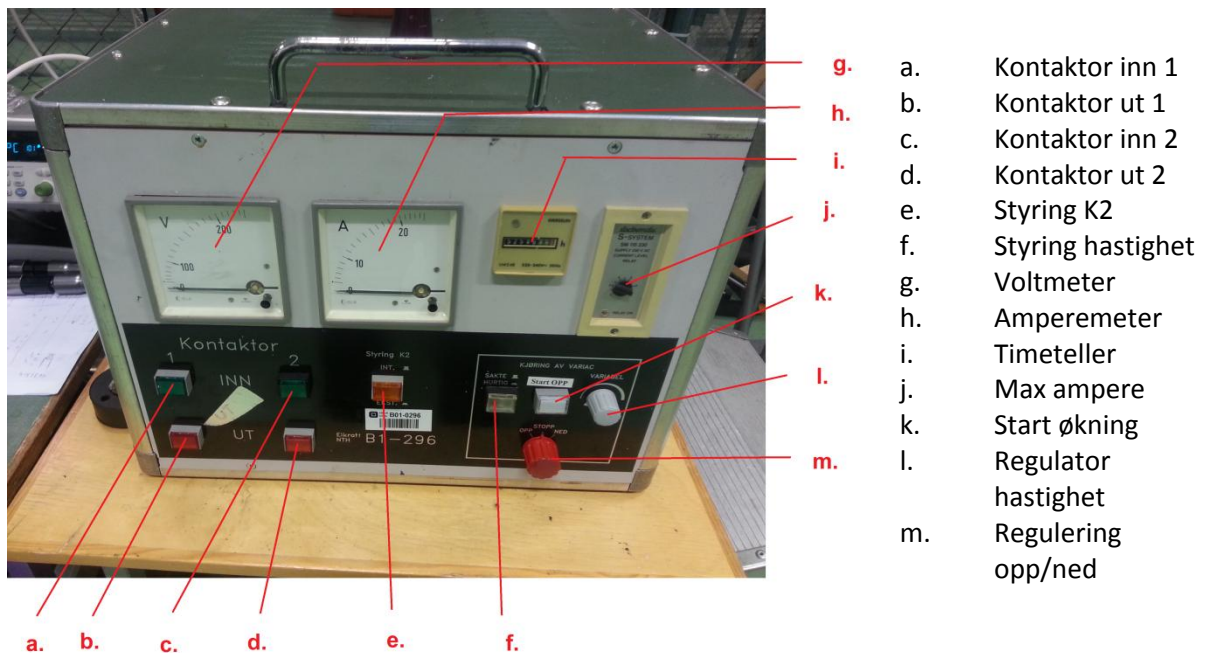
Temperatursensorene på hvert vannrør er koblet inn i temperaturloggeren (a.) som sender informasjonen videre til datamaskinen (c.) der et program (b.) som heter Agilent BenchLink Data Logger 3 fortløpende fremstiller temperaturene grafisk på skjermen. På denne måten kan temperaturen, samtidig som den loggføres i en egen mappe, kontrolleres i nåtid.

Temperaturlogger: Agilent 34972A LXI Data Acquisition / Switch Unit

Datamaskin: Dell Latitude | D630



## Variacen



Figur E.7: Variacen

Variacen som er av typen electromatic S-system SM 115 230 kan generere spenninger opp til 230 V AC.

Moduser:

- Modus 1: spenningskilden er slått av og ingen lys lyser
- Modus 2: spenningskilden er klar for oppstart og varsellampen på toppen av variacen blinker
- Modus 3: spenningskilden er satt på og varsellampen på toppen av variacen lyser kontinuerlig

Oppstart av variacen:

For å starte spenningskilden må først Kontaktor inn 1 (a.) trykkes inn. Systemet går da fra modus 1 til modus 2. Deretter trykkes Kontaktor inn 2 (c.) inn. Dersom systemet er koblet opp korrekt og strømnivået ikke overstiger den gitte grensen (j.) vil variacen gå over til modus 3. Dersom det er en feil vil variacen ikke endre modus.

Kjøring av variacen:

Etter at spenningen er satt på, kan spenningen stilles inn. Da kan hurtigheten enten bestemmes mellom hurtig/sakte med hastighetsstyringen (f.) eller ved å stille inn hastighetsregulatoren (l.). Disse knappene regulerer hastigheten. Deretter må det velges om spenningen skal opp eller ned (m.). Dersom bryter (m.) stilles på ned, vil spenningen reduseres uten at noen andre knapper må trykkes inn. Dersom den stilles på opp, må start økning knappen (k.) holdes inne til systemet når ønsket spenning.

Under kjøring av variacen:

Mens variacen kjører, kan spenning og strøm måles på voltmeteret (g.) og amperemeteret (h.). Mens systemet går vil også timetelleren telle hvor lenge variacen står på.

Stopp av variacen:

Når variacen skal slås av, må først Kontaktor ut 2 (d.) trykkes inn. Da vil systemet gå fra modus 3 til modus 2. Deretter må Kontaktor ut 1 (b.) trykkes inn. Da vil systemet gå fra modus 2 til modus 1.

Nødstopp av variacen:

Dersom det blir behov for en nødstopp av systemet, trykkes Kontaktor ut 1 med en gang. Da går systemet direkte ned til nivå 1.

### Transformator



Transformatoren som ble benyttet i denne oppgaven var en enfaset Ferranti transformator. Den hvite kabelen på bildet fører spenningen fra variacen til transformatoren, mens aluminiumstaven på toppen av transformatoren fører den transformerte spenningen videre til prøveobjektene.

Figur E.8: Transformator

Merkeverdier:

Diagram No	W.50664	Phases	1 phase	Cycles	50
Voltage	220/100 000 V	Serial No	162276	Oil	30 Galls
Total weight	621 lbs	W.O.Na	11651/24912		

Tabell E.5: Merkeverdier 1, transformator

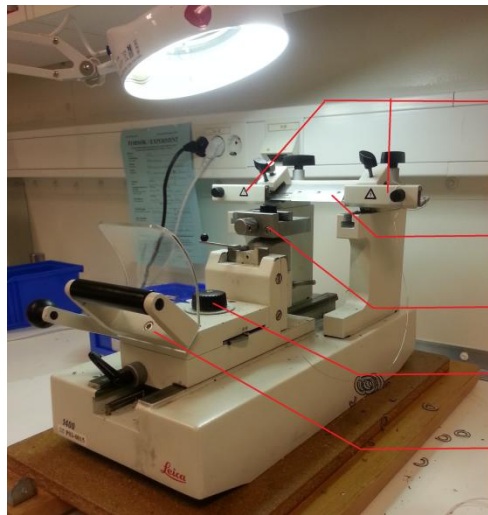
Primary volts	Secondary volts	Link across	K.V.A
220	50 000	t2 – t3	3 ¾
220	100 000	t4 – t2: t3 – t1	7 ½

Tabell E.6: Merkeverdier 2, transformator

Rating at	
40 °C Ambient	
7 ½ K.V. A	Cont.
10 K. V. A	2 hours

Tabell E.7: Merkeverdier 3, transformator

### Mikrotom



- a. beskyttelsesdeksel
- b. knivblad
- c. festepunkt for kabelsegmenter  
(beveges vertikalt)
- d. bryter som bestemmer vertikal  
bevegelse
- e. håndtak (beveges horisontalt)

Figur E.9: Mikrotom

Mikrotomet, som er av typen Leica 1400, er en kabelsnitter og benyttes til å kutte kabelsegmentene som plasseres i festepunktet (c.) opp i tynne snitt. Dette er mulig da festepunktet kan beveges både vertikalt (d.) og horisontalt (e.). Bryteren (d.) stiller inn hvor høyt festepunktet skal heves for hvert snitt, og bestemmer på denne måten snittets tykkelse. En hel rotasjon av bryteren gir snitt med tykkelse 0,25 mm. Beskyttelsesdekslene (a.) benyttes til å beskytte omgivelsene fra det skarpe knivbladet (b.) når mikrotomen ikke er i bruk.

## Magnetrører



- a. plate som kan utsettes for både et roterende magnetfelt og oppvarming
- b. temperaturregulator
- c. varme av/på
- d. magnetfelt av/på
- e. rotasjonshastighetsregulator

Figur E.10: Magnetrører

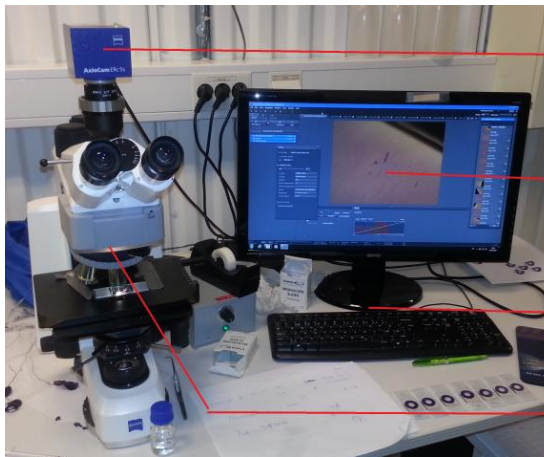
Magnetrøreren, som er av typen IKA – COMBIMAG RCT, setter opp et roterende magnetfelt i platen på toppen (a.). Denne platen kan også varmes opp, en funksjon som ikke ble benyttet i denne oppgaven. Magnetfeltet settes på ved å trykke på knappen (d.), og hastigheten det magnetiske feltet roterer kan reguleres ved å skru på rotasjonshastighetsregulatoren (e.)

Merkeverdier:

Type	RCT	Nr.	25196
Voltage	220 V	Frequency	50 Hz
Effect heater	600 W	Effect motor	30 W
RpM	0 - 1100		

Tabell E.8: Merkeverdier, magnetrører

## Mikroskop og analysesystem



a.

a. Kamera

b. ZEN (dataprogram)

b.

c. Datamaskin

c.

d. Mikroskop

d.

Figur E.11: Mikroskop og analysesystem

I analysen av de ulike snittene, ble det benyttet et mikroskop (d.). På toppen av dette mikroskopet var det plassert et kamera (a.) som kunne ta bilder av snittene samtidig som de ble analysert. Disse bildene ble så ført videre til datamaskinen (c.) der et dataprogram (b.) behandlet bildene. Dette dataprogrammet het ZEN 2011, og var et program som kunne benytte informasjon om mikroskopets forstørrelsesgrad for så å måle lengden av hvert vantage.

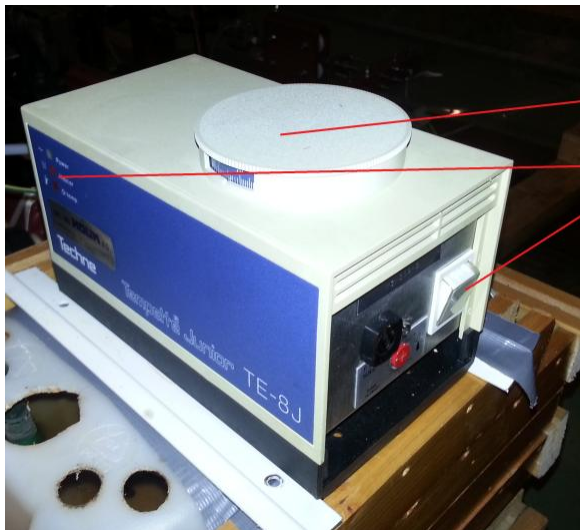
Kamera: AxioCam ERc 5s

Program: ZEN 2011

Datamaskin: Nexus

Mikroskop: Carl Zeiss Axio scope

## Varmeelement 2



- a. Temperaturregulator
- b. Informasjonsrelé
- c. Av/på varmeelement

Figur E.12: Det andre varmeelementet som ble benyttet

Dette varmeelementet som er av typen Techne, Tempette Junior TE-8J ble, benyttet på slutten av den tredje gjennomkjøringen og hele den fjerde gjennomkjøringen. Ved å skru på varmeelementet (c.) stiger temperaturen til en metallspiral som er senket ned i vannet. Denne spiralen varmer således opp vannet. Vannets temperatur stilles inn ved å skru på temperaturregulatoren (a.) på toppen av varmeelementet. På siden av varmeelementet finnes det et informasjonsrelé (b.) der den øverste lampen lyser så lenge varmeelementet er skrudd på. Den andre lampen lyser dersom vannet er under oppvarming, og den nederste lampen lyser ved feil eller overoppheting. Nede i karet finner vi en temperatursensor som regulerer oppvarmingen og en intern vannpumpe som sirkulerer vannet ved varmeelementet.

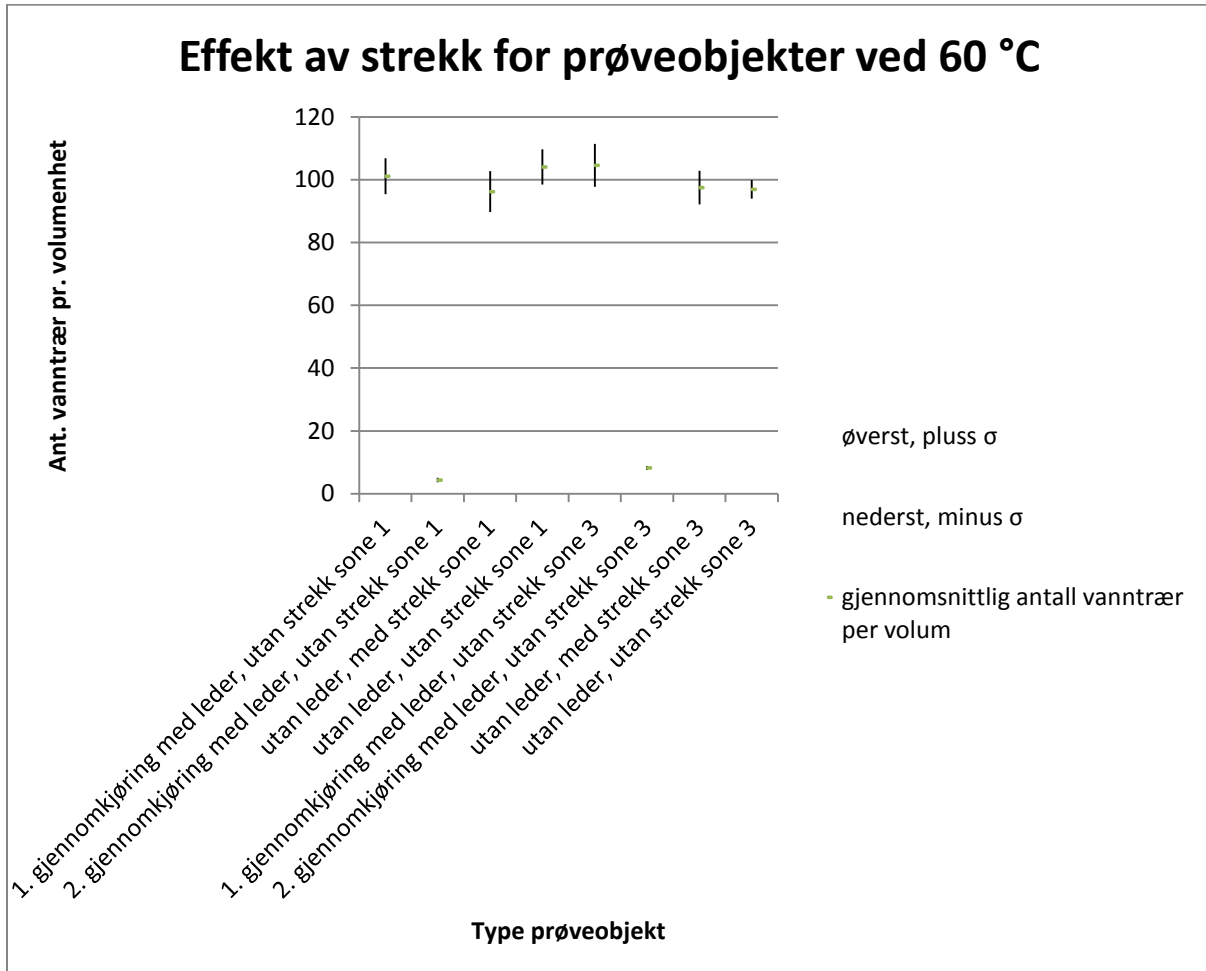
Merkeverdier:

Model	TE-8J	Serial number	16046 – 7
Voltage	240 V	Current	5 A
Power	1000 W	Frequency	50/60 Hz
Phases	Single phase		

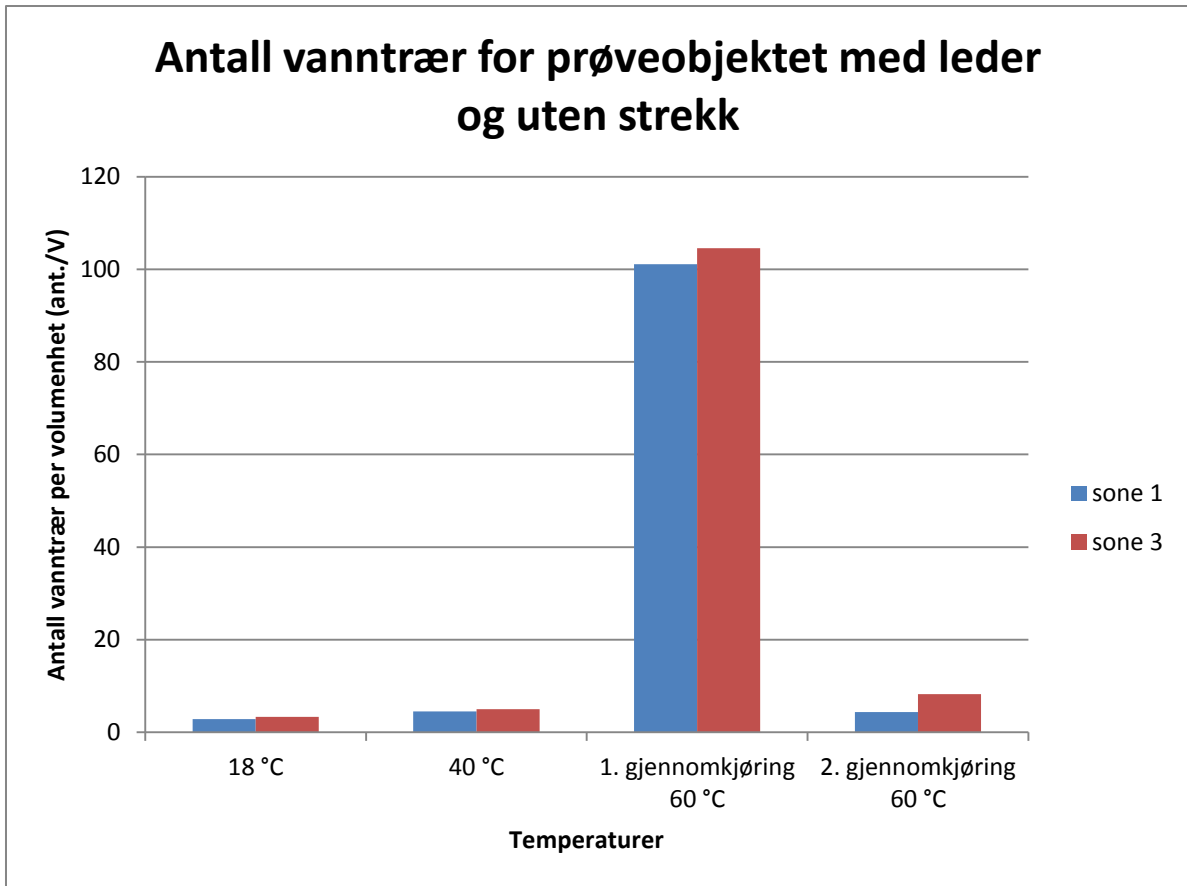
Tabell E.9: Merkeverdier, varmeelement

## Vedlegg F: Fremstillinger av resultater som ikke ble med i hovedteksten

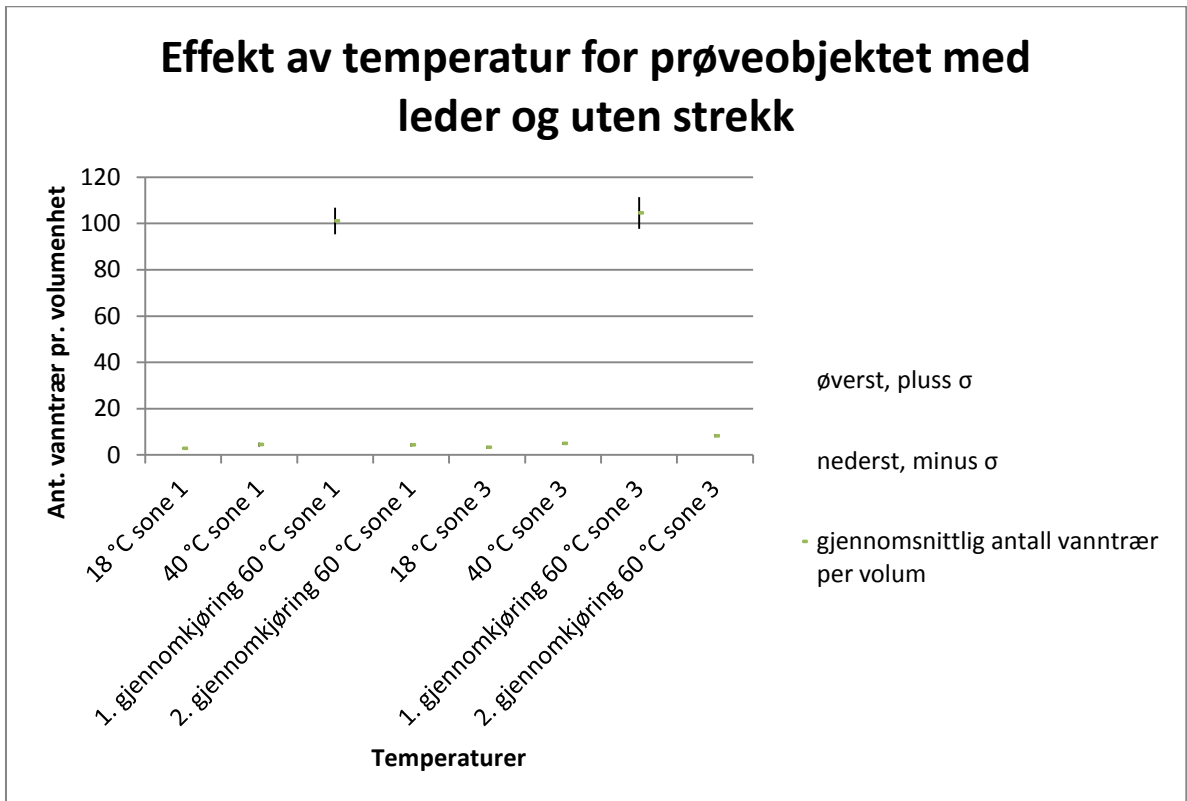
Figurene som følger er figurer som ble overflødige å ta med i resultatdelen, men som likevel er av interesse for videre studier.



Figur F.1: Effekt av strekk for prøveobjekter ved 60 °C

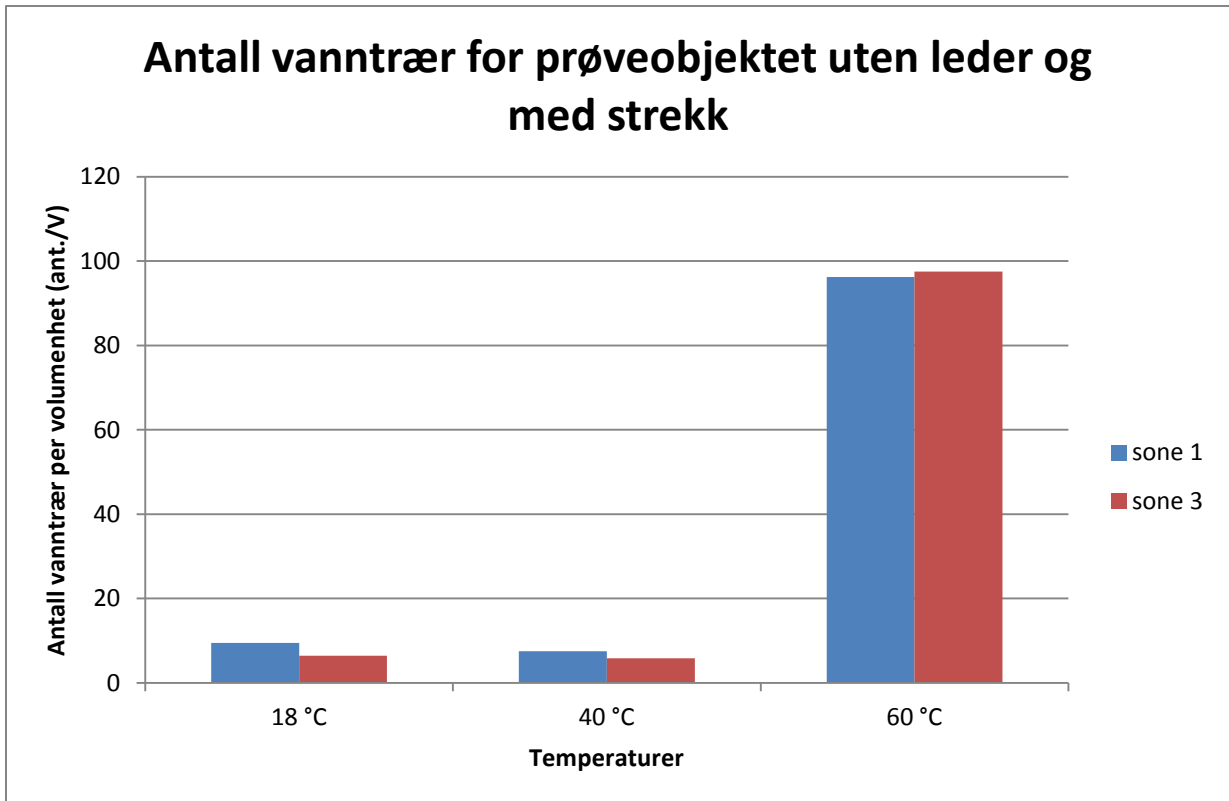


Figur F.2: Antall vanntreer for prøveobjekter med leder og uten strekk

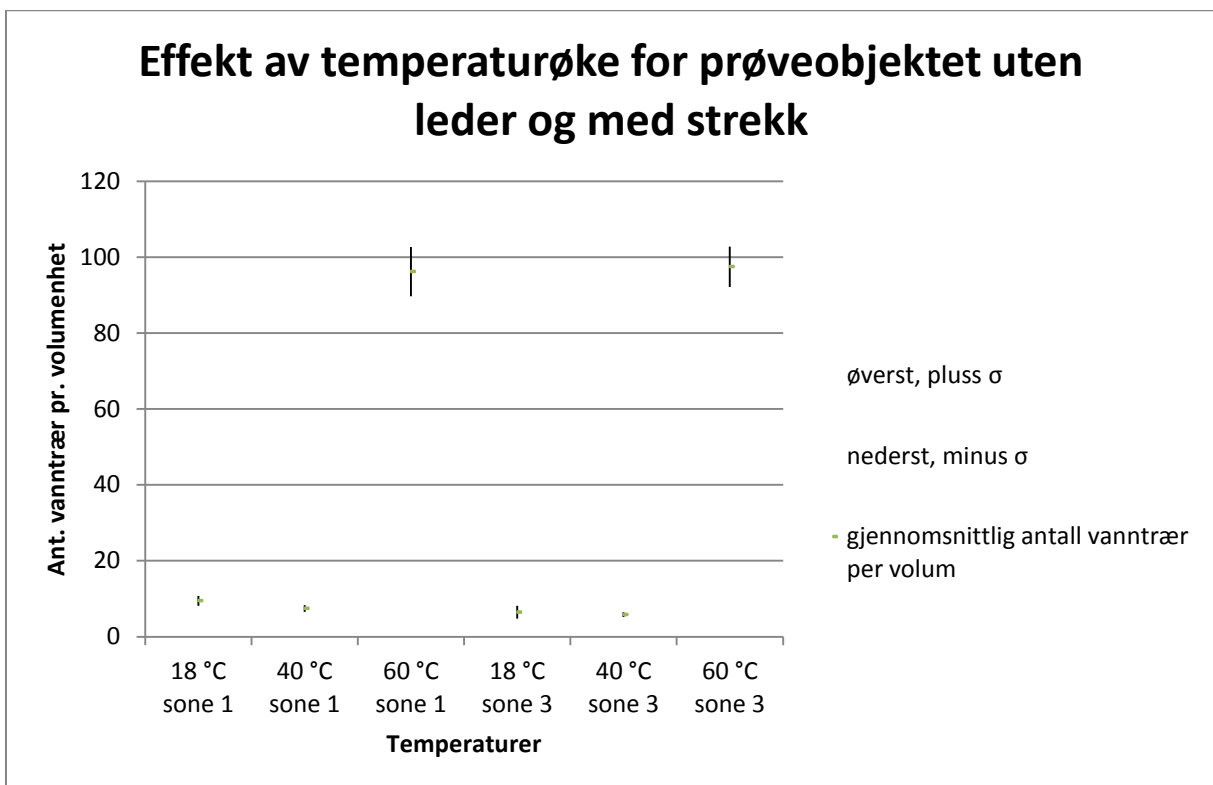


Figur F.3: Effekt av temperatur for prøveobjekter med leder og uten strekk

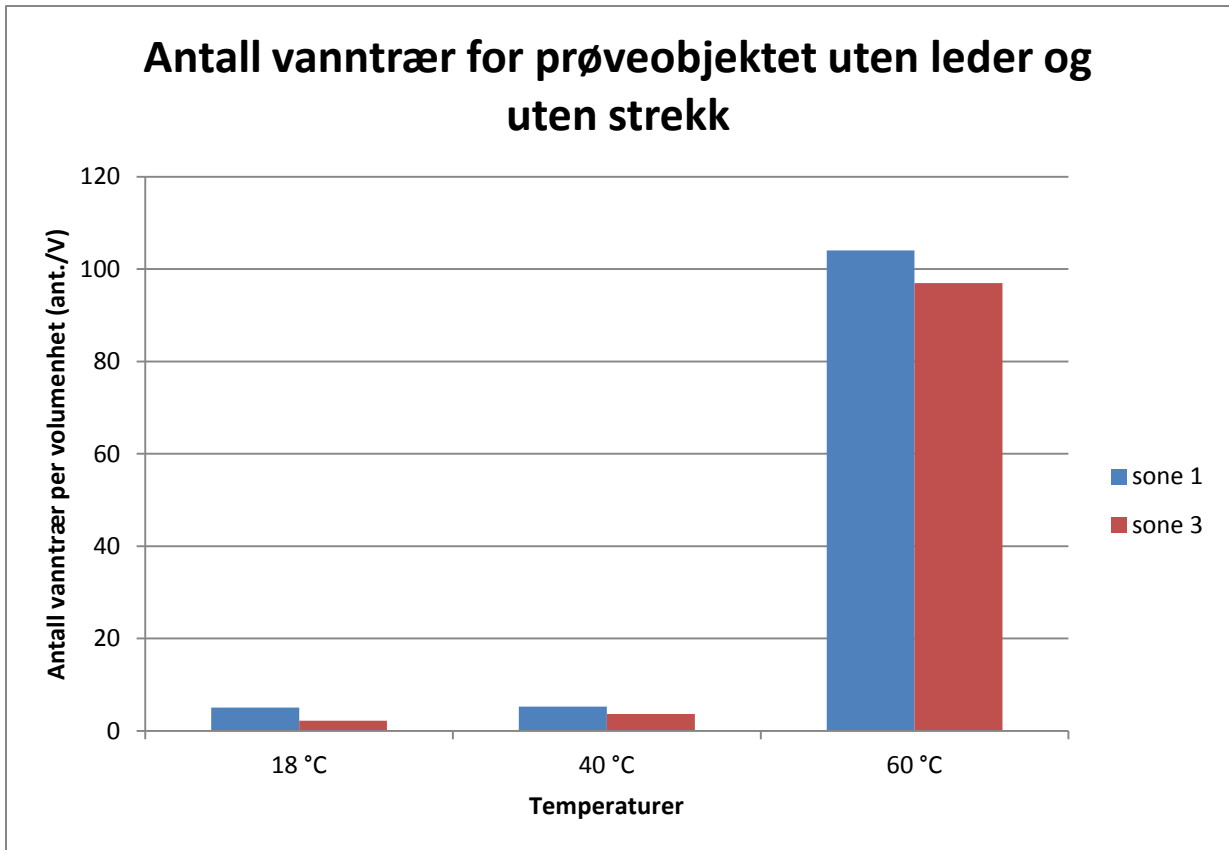




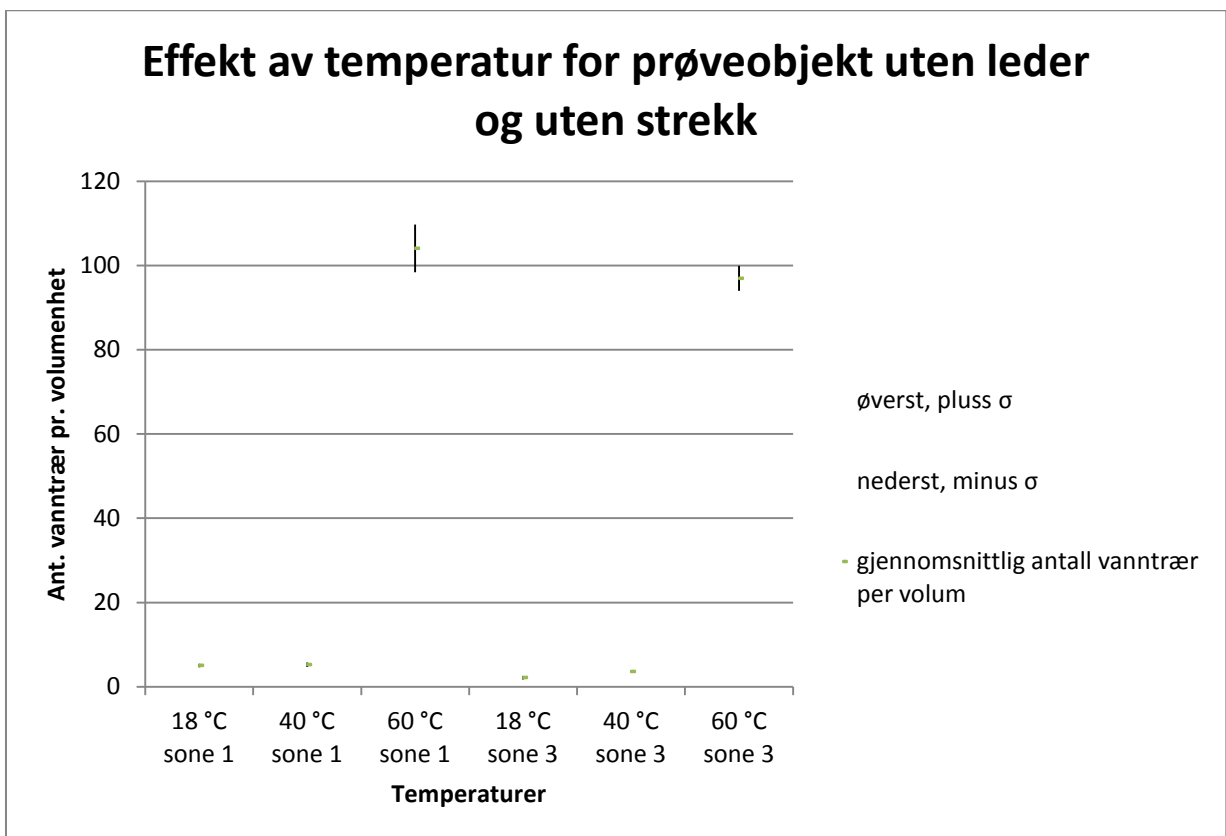
Figur F.4: Antall vanntrær for prøveobjektet uten leder og med strekk



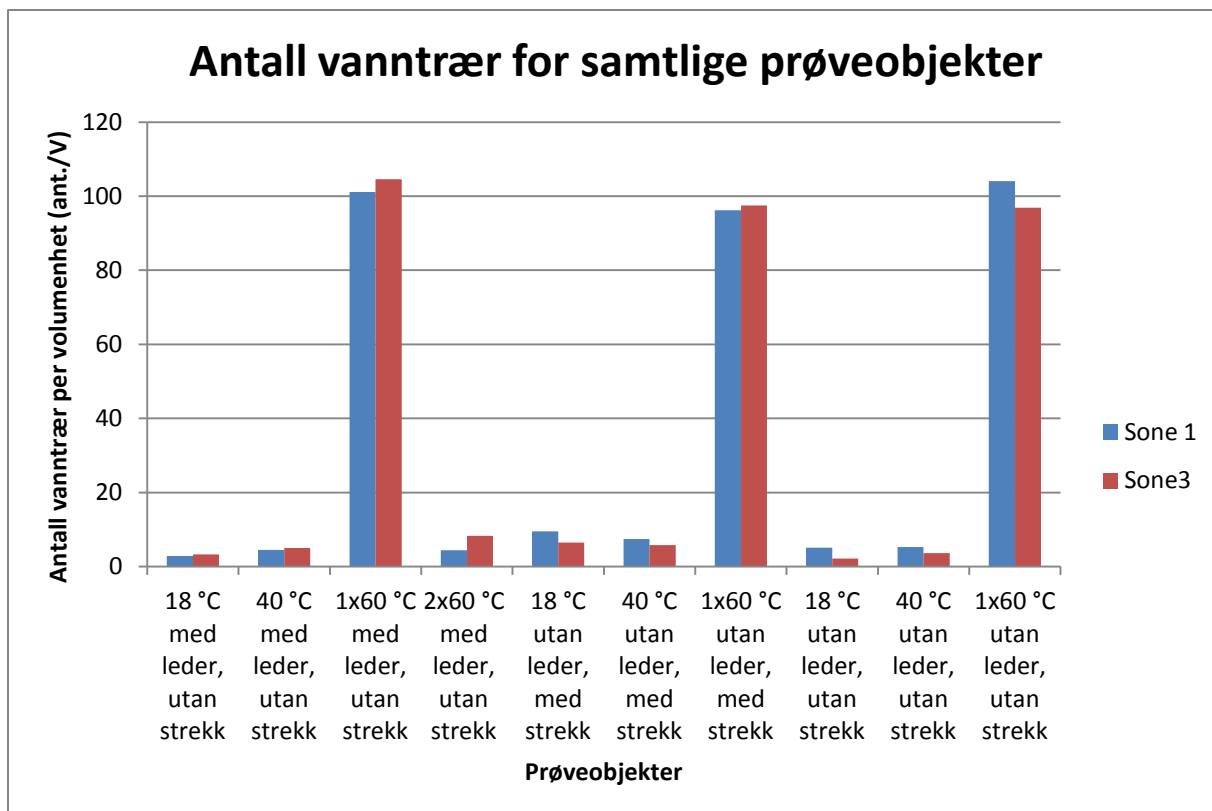
Figur F.5: Effekt av temperatur for prøveobjektet uten leder og med strekk



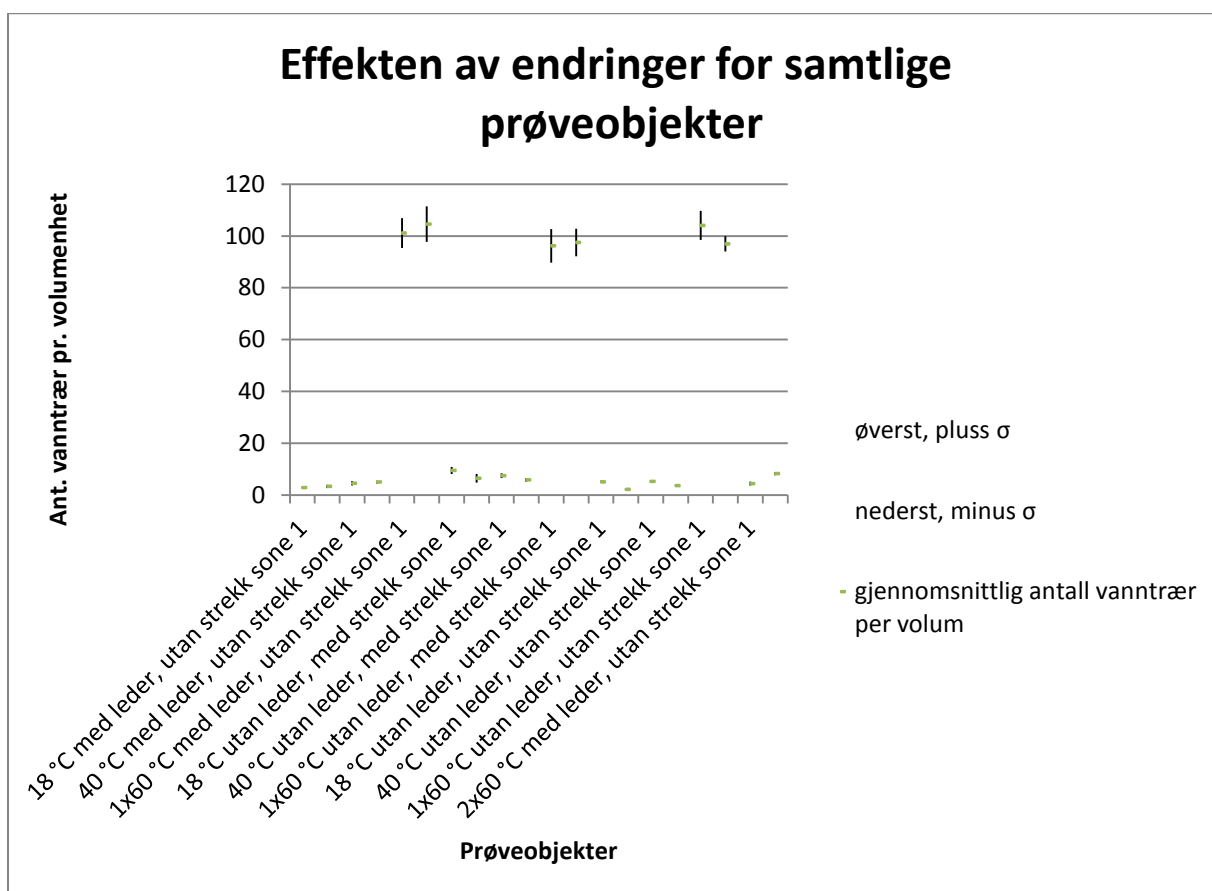
Figur F.6: Antall vanntrær for prøveobjektet uten leder og uten strekk



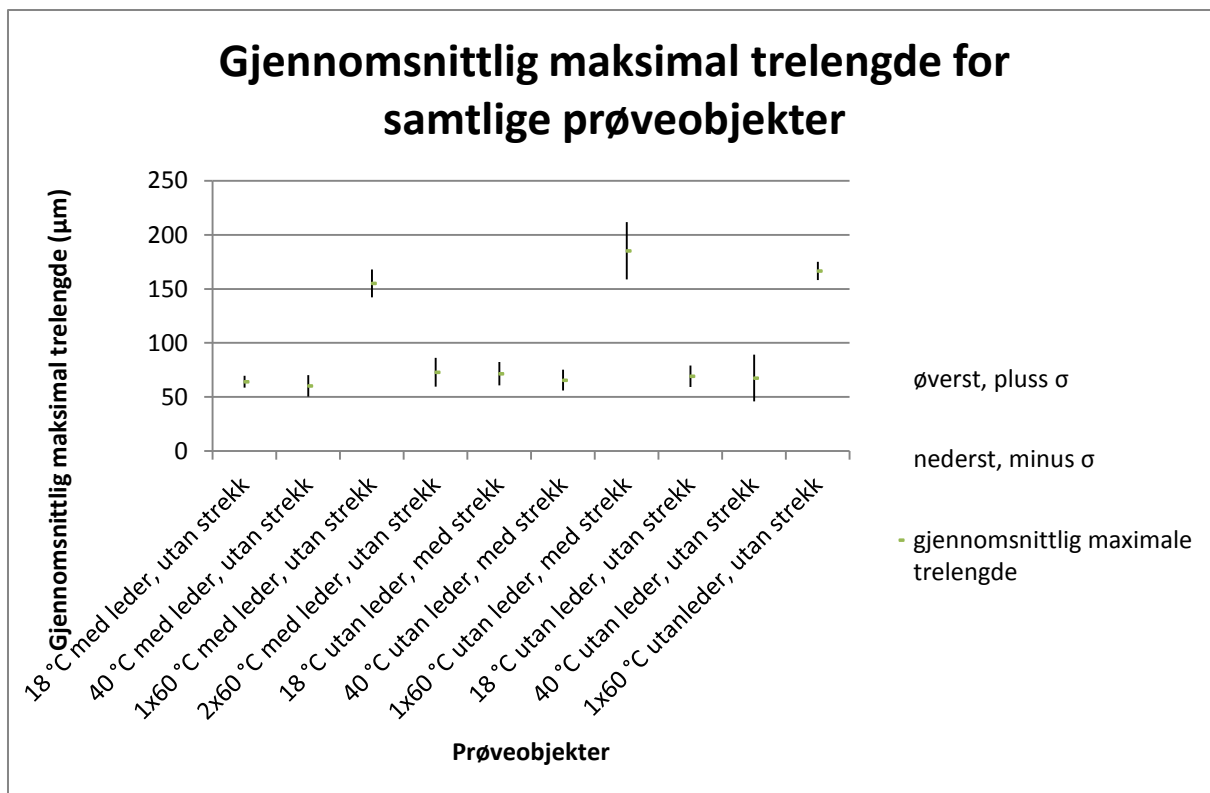
Figur F.7: Effekt av temperatur for prøveobjektet uten leder og uten strekk



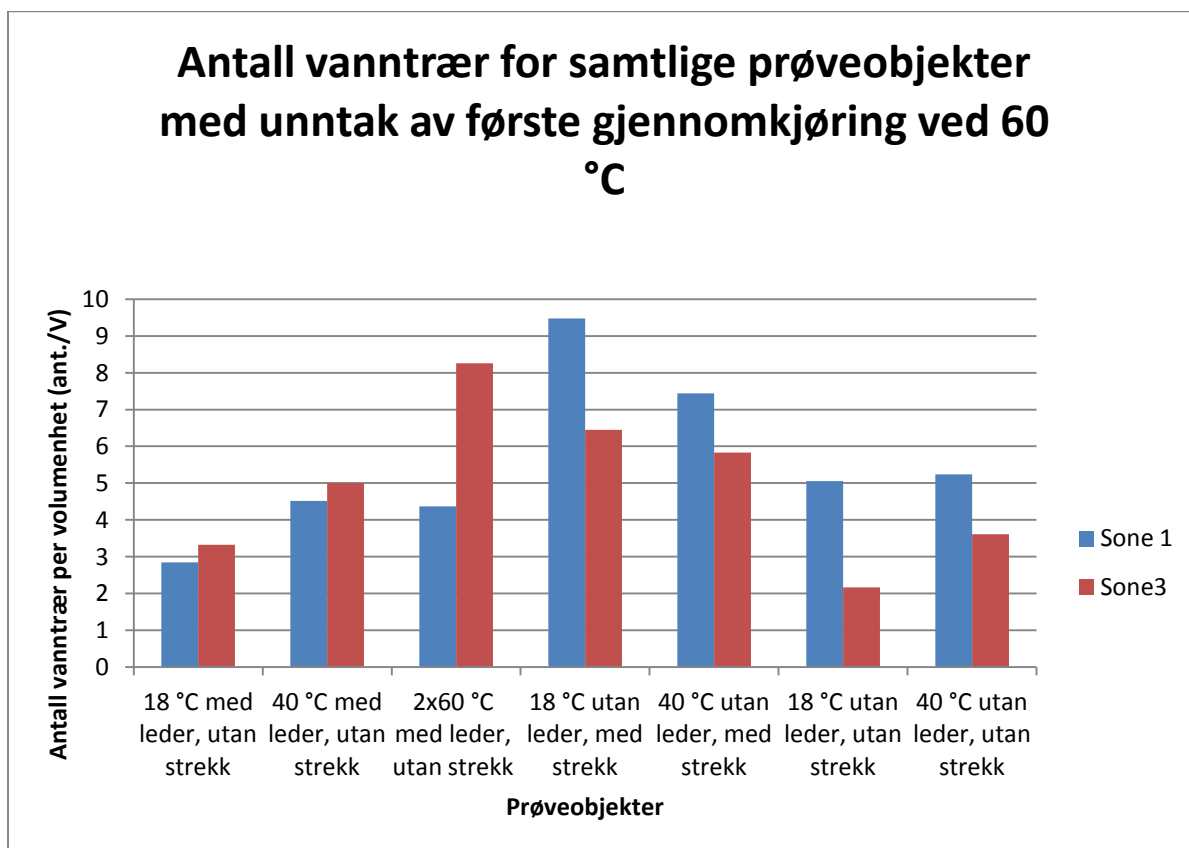
Figur F.8: Antall vanntrær for samtlige prøveobjekter



Figur F.9: Effekten av endringer for samtlige prøveobjekter

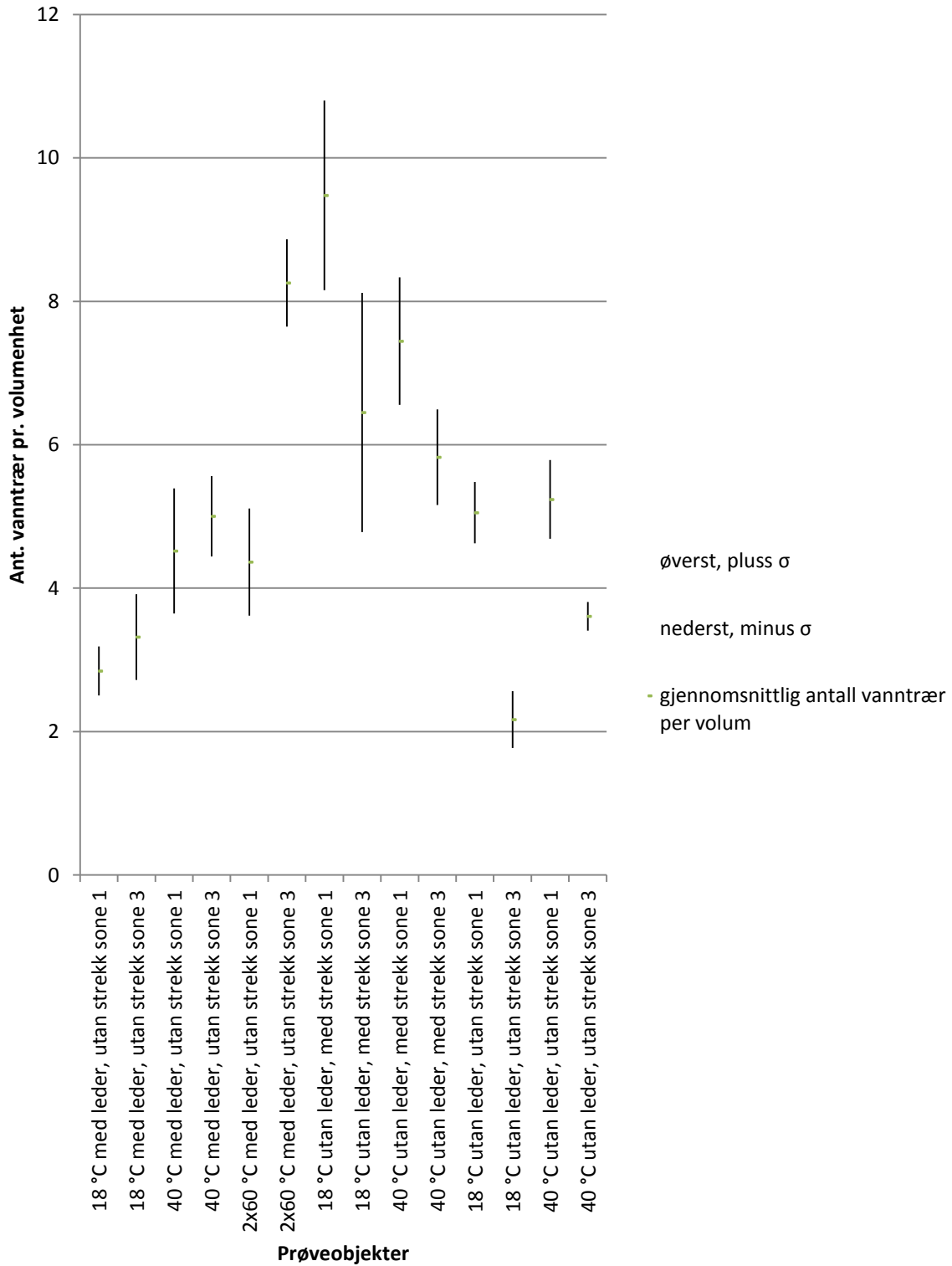


Figur F.10: Gjennomsnittlig maksimal tre lengde for samtlige prøveobjekter



Figur F.11: Grafer som viser antall vanntrær for samtlige prøveobjekter med unntak av første gjennomkjøring ved 60 °C

## Effekten av endringer for samtlige prøveobjekter med unntak av første gjennomkjøring ved 60 °C



Figur F.12: Standardavvik som viser effekten av endringer for samtlige prøveobjekter med unntak av første gjennomkjøring ved 60 °C

