

# Elektrisk trevekst i isolasjonsmaterialer for høyspente AC konnektorer

Effekt av syntetisk ester og hydrostatisk trykk

**Rune Gravaune**

Master i energi og miljø

Innlevert: juni 2015

Hovedveileder: Frank Mauseth, ELKRAFT

Medveileder: Sverre Hvidsten, SINTEF Energi

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet  
Institutt for elkraftteknikk



---

## **Problem description**

The demands towards future oil and gas production include increased recovery and long step-outs. Subsea processing is considered as one of the main issues in achieving these goals. To enable the next generation subsea boosting and processing facilities, high power electrical connectors are strongly needed and considered one of the most critical components. The project work will be a part of a four year research project on subsea connectors run by SINTEF Energy Research and NTNU in cooperation with several international connector manufacturers.

Electrical tree growth is a precursor to electrical breakdown in high voltage insulations. This project work will mainly be experimental, where the main purpose is to build and test a new experimental set-up for studying electrical treeing at high hydrostatic pressures. In addition, characterization of oil sorption of the material will also be included. Also, mechanical properties such as tensile strength will be measured to find the influence of the absorbed oil.

This work will be important when choosing design and material combinations for the next generation high voltage AC connectors, aiming for higher voltages than today's connectors.

---

---

## Forord

Denne masteroppgaven er skrevet ved NTNU våren 2015 som en del av energi og miljø studiet med fordypning innen elektrisk energiteknikk og smarte nett. Oppgaven teller som full studiebelastning i 10 semester, og er en videreføring av prosjektoppgaven gjennomført 9. semester [1]. Første del av oppgaven er å studere tilgjengelig litteratur, og deler av kapittelet som omhandler teori vil nødvendigvis være en gjentakelse av prosjektoppgaven. Oppgaven er skrevet som en del av et overordnet prosjekt (High Voltage Subsea Connections) ledet av SINTEF Energi i samarbeid med NTNU, og alle laboratorieforsøk er gjennomført hos SINTEF Energi og Institutt for Elkraftteknikk ved NTNU.

Oppgaven er skrevet med tanke på en leser som har kunnskaper innen elkraftteknikk, høyspenningsisolasjon, mekanikk og diffusjon slik at grunnleggende fenomener og fagterminologi antas å være kjent.

Jeg vil rette en stor takk til førsteamanuensis Frank Mauseth ved NTNU og seniorforsker Sverre Hvidsten ved SINTEF Energi for gode råd og veiledning i denne oppgaven. Jeg vil også takke forsker Hans Helmer Sæternes ved SINTEF Energi for mye hjelp til den praktiske gjennomføringen av prosjektet.

Trondheim, Juni 2015



Rune Gravaune

---

---

## Sammendrag

En subseakonnektor er et komplekst isolasjonssystem som brukes til å koble sammen kabler, noder osv. på havbunnen. Silikon er et polymerisk materiale som er egnet bl.a. som membran til å svipe av vann fra kontakten ved til- og frakobling av konnektoren. En av de vanligste årsakene til havari i slik polymerisk isolasjon er partielle utladninger og dannelse av elektriske trær.

Hensikten med denne oppgaven var å undersøke effekten av hydrostatisk trykkrefter og olje på elektrisk trevekst i silikon. Dette er et område det er forsket lite på fra før, og den største delen av oppgaven var å bygge et testoppsett for å kunne studere elektrisk trevekst under trykk. For å ha kontroll på hvor mye olje silikonet tok opp var det nødvendig å gjennomføre diffusjonsmålinger. Testobjekter av silikon ble lagt ned i olje, og vektøkningen ble målt. Testobjektet for elektrisk trevekst besto av en nål laget av rustfritt stål som ble støpt inn i silikon, slik at avstanden mellom nålspissen og jordelektroden var 2 mm. Testobjektene for diffusjon og trevekst var like store, og det ble antatt at det tok like lang tid å mette de med olje. Testobjektet ble plassert i en trykktank og treveksten ble undersøkt gjennom vinduer i tanken ved hjelp av mikroskop og bakgrunnsbelysning. Det ble også gjennomført strekktester.

Det ble i alt gjennomført 30 tester med elektrisk trevekst, og resultatene fra trevekstanalysen er basert på i overkant av 20 000 bilder som ble tatt av nål-plategapet.

Følgende hovedkonklusjoner kan trekkes fra arbeidet:

- Gjennomslagspenningen er høyere i silikon som er mettet med olje enn silikon som ikke inneholder olje. Dette gjelder både ved atmosfærisk trykk og 50 bar væsketrykk.
- Strukturen og vekstutviklingen i bredde og lengde er avhengig av oljeinnhold og hydrostatisk trykk.
- I de fleste oljemettede testobjektene vokste det elektriske treet kun et lite stykke ut fra nålspissen før veksten stagnerte.
- I de tørre testobjektene vokste det elektriske treet med omvendt eksponentiell hastighet med hensyn på tiden i både lengde og bredde de første minuttene. Ved 50 bar væsketrykk fortsatte treveksten med varierende hastighet gjennom resten av isolasjonen.
- Det så ut til at oljen forandret de mekaniske egenskapene til silikonet.

---



---

## Abstract

A subsea connector is a complex insulation system used to connect cables, nodes, etc. on the seabed. Silicone is a material that is suitable as a membrane to wipe water of the contact when mating and demating. One of the most common failure mechanisms for polymer insulation is partial discharges leading into initiation and growth of electrical trees.

The purpose of this study was to investigate how hydrostatic pressure and oil sorption effect the growth of electrical trees in silicone. Not much research has previously been done on this field. The main purpose of this project was to build and test a new experimental set-up for studying electrical treeing at high hydrostatic pressure. The sorption of oil into the silicone was measured by weighing the silicone before and after submerging it into oil, and plotting as a function of time. The test objects were of equal sizes, so the saturation times were assumed to be equal for all objects. The test objects for electrical tree growth consisted of a stainless steel needle casted into silicone, with a distance of 2 mm between the needle tip and the ground electrode. The test object was placed in a pressure vessel, and the electric tree growth was examined through a microscope. Tensile force experiments were also carried out.

The analyses of the electrical trees are based on 30 tests, and more than 20 000 photos of the gap between the needle and the ground electrode.

From this work, the following conclusions can be made:

- The breakdown voltage is higher in silicone saturated with oil compared to silicone that does not contain oil. This was observed at both atmospheric pressure and 50 bar liquid pressure.
- The structure and growth of the tree both in length and width is dependent on the oil content and the pressure.
- In most of the test objects saturated with oil, the electrical tree growth stagnated a short distance out from the needle tip.
- The electrical tree grew with inversely exponential speed with respect to time both in length and width direction during the first few minutes. At 50 bar liquid pressure the tree growth continued at various speeds through the insulation before the ground electrode was reached.
- The oil seemed to change the mechanical characteristics of silicone.



# Innholdsfortegnelse

Problem description	i
Forord	iii
Sammendrag	v
Abstract	vii
<b>1 Innledning</b>	<b>1</b>
1.1 Bakgrunn	1
1.2 Subseakonnektoren	2
1.3 Hypoteser	4
<b>2 Teori</b>	<b>5</b>
2.1 Diffusjon	5
2.2 Partielle Utladninger	7
2.3 Elektrisk Trevekst	8
2.3.1 Initierting	8
2.3.2 Vekst	8
2.3.3 Gjennomslag	9
2.3.4 Innvirkning av spenning og frekvens	10
2.3.5 Oljens innvirkning på elektrisk trevekst	12
2.3.6 Mekaniske egenskaper	12
2.3.7 Vekst og struktur	13
2.3.8 Innvirkning av hydrostatisk trykk	14
<b>3 Eksperimentelt</b>	<b>17</b>
3.1 Testobjektene	17
3.1.1 Klargjøring av silikon før støping	17
3.1.2 Støpeprosess og bearbeiding	18

3.2	Målemetoder . . . . .	22
3.2.1	Diffusjon av olje . . . . .	22
3.2.2	Elektrisk Trevekst . . . . .	24
3.2.3	Mekaniske egenskaper . . . . .	28
<b>4</b>	<b>Resultater</b>	<b>29</b>
4.1	Diffusjon . . . . .	29
4.2	Elektrisk Trevekst . . . . .	32
4.2.1	Gjennomslagsspenning og spenning ved begynnende trevekst . . . . .	33
4.2.2	Langtidstesting . . . . .	35
4.3	Mekaniske egenskaper . . . . .	47
<b>5</b>	<b>Diskusjon</b>	<b>49</b>
5.1	Diffusjon . . . . .	49
5.2	Elektrisk trevekst . . . . .	51
5.2.1	Gjennomslagsspenning og spenning ved begynnende trevekst . . . . .	51
5.2.2	Lengdeutvikling . . . . .	52
5.2.3	Temperatur og statistikk . . . . .	54
5.2.4	Mikroskopet . . . . .	55
5.3	Mekaniske egenskaper . . . . .	56
5.4	Testobjektene . . . . .	56
<b>6</b>	<b>Konklusjon</b>	<b>59</b>
6.1	Konklusjon . . . . .	59
6.2	Videre arbeid . . . . .	61
	<b>Litteraturliste</b>	<b>63</b>
	<b>Vedlegg A Diffusjon</b>	<b>67</b>
A.1	Kurvetilnærmingsplotting for diffusjonskonstanter . . . . .	67
A.2	Måledata for diffusjonseksperiment . . . . .	70
	<b>Vedlegg B Elektrisk Trevekst</b>	<b>77</b>
	<b>Vedlegg C Datablad</b>	<b>89</b>

# Figurer

1.1	Prinsippskisse for en subseakonnektor. . . . .	2
1.2	Strukturformel for silikon. . . . .	3
2.1	Paschenkurve. . . . .	9
2.2	RC-krets analogi for elektrisk trevekst. . . . .	11
2.3	Buskvekst. . . . .	13
2.4	Grenvekst. . . . .	14
3.1	Støpeform for silikon diffusjonstestobjekt laget av stål. . . . .	18
3.2	Bilde av diffusjonstestobjekt. . . . .	19
3.3	Ferdig testobjekt for elektrisk trevekst. . . . .	20
3.4	Støpeform for testobjekt til elektrisk trevekst. . . . .	20
3.5	Simulert elektrisk felt i et nål-plategap. . . . .	21
3.6	Bilde av nålpissen brukt i testobjekt for elektrisk trevekst. . . . .	21
3.7	Måleoppsett for diffusjonseksperiment. . . . .	22
3.8	Teoretisk diffusjonsforløp. . . . .	23
3.9	Trykktanken. . . . .	24
3.10	Lokk på trykktank. . . . .	25
3.11	Kabelgjennomføring i trykktett lokk. . . . .	25
3.12	Oppsett for eksperiment med elektrisk trevekst. . . . .	26
3.13	Varsellys. . . . .	26
3.14	Bilde av oppsettet for eksperiment med elektrisk trevekst. . . . .	27
3.15	Bilde av hundebein med arbeidsområde. . . . .	28
4.1	Vektøkning for silikontestobjekter. . . . .	30
4.2	Spenningsnivå for Slow Rate-of-Rise Test. . . . .	32

4.3	Bilde av nålspiss for et oljemettet testobjekt. . . . .	34
4.4	Lengdeutvikling i oljemettet testobjekt ved atmosfærisk trykk og 12 kV. . . . .	36
4.5	Breddeutvikling i oljemettet testobjekt ved atmosfærisk trykk og 12 kV. . . . .	36
4.6	Vekstutvikling våt atmosfærisk trykk bilder. . . . .	37
4.7	Lengdeutvikling i tørt testobjekt ved atmosfærisk trykk og 8 kV. . . . .	38
4.8	Breddeutvikling i tørt testobjekt ved atmosfærisk trykk og 8 kV. . . . .	38
4.9	Lengdeutvikling de første 10 minuttene i tørt testobjekt ved atmosfærisk trykk og 8 kV. . . . .	39
4.10	Breddeutvikling de første 10 minuttene i tørt testobjekt ved atmosfærisk trykk og 8 kV. . . . .	39
4.11	Vekstutvikling tørr atmosfærisk trykk bilder. . . . .	40
4.12	Lengdeutvikling i tørt testobjekt ved 50 bar og 11 kV. . . . .	41
4.13	Breddeutvikling i tørt testobjekt ved 50 bar og 11 kV. . . . .	42
4.14	Vekstutvikling tørr 50 bar bilder. . . . .	43
4.15	Lengdeutvikling i oljemettet testobjekt ved 50 bar og 17 kV. . . . .	44
4.16	Breddeutvikling i oljemettet testobjekt ved 50 bar og 17 kV. . . . .	44
4.17	Vekstutvikling våt 50 bar bilder. . . . .	45
4.18	Testobjekt nr 16 etter 60 timer, 1 minutt og 45 sekunder. . . . .	46
4.19	Bilde av tørt og vått diffusjonstestobjekt. . . . .	48
A.1	Silikon testobjekt nr 1. . . . .	67
A.2	Silikon testobjekt nr 2. . . . .	68
A.3	Silikon testobjekt nr 3. . . . .	68
A.4	Silikon testobjekt nr 4. . . . .	69
A.5	Silikon testobjekt nr 5. . . . .	69

# Innledning

## 1.1 Bakgrunn

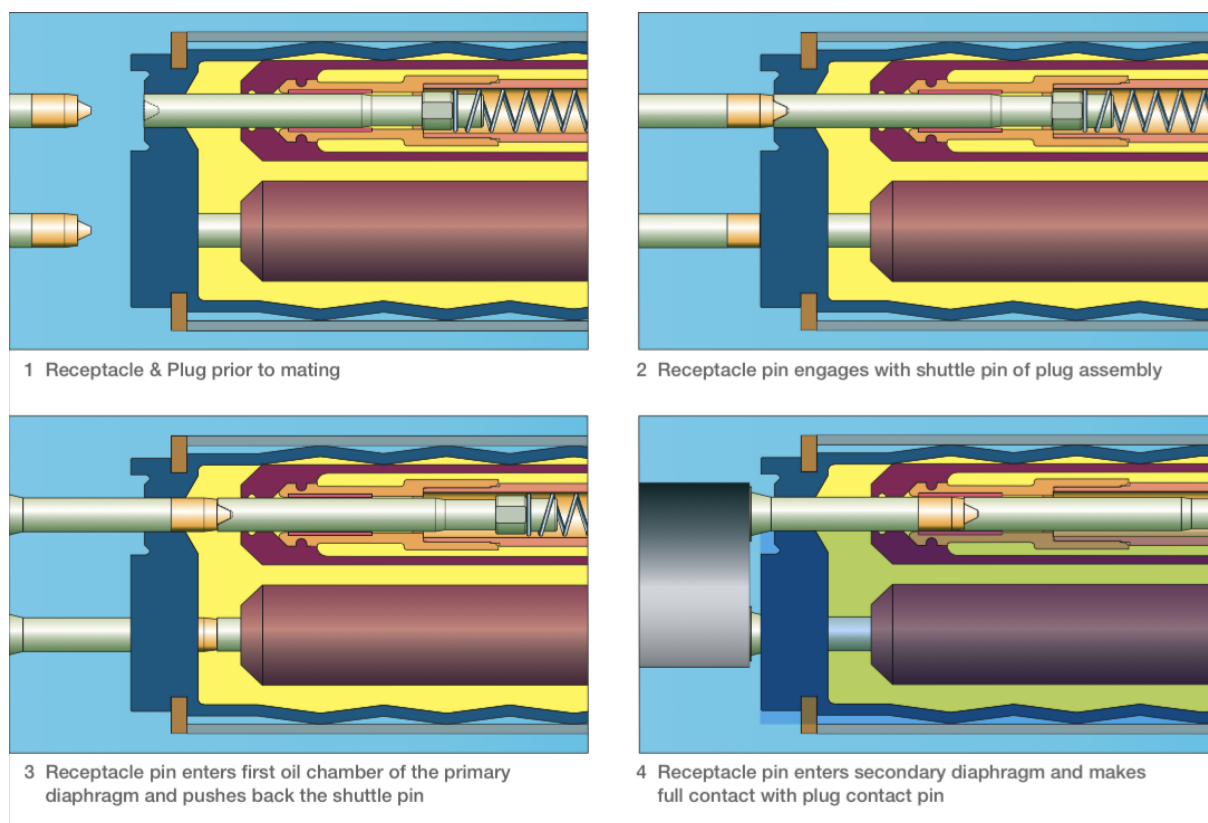
Overføring av elektrisitet over lange avstander via konvensjonelle metoder som luftlinjer er ikke alltid mulig. Dette gjelder spesielt ved overføring over havområder, og ved slike tilfeller er det vanlig at elektrisitet overføres via subseakabler. Fra før finnes det subseakabler mellom Norge og Nederland, Norge og Danmark, og Statnett har fått godkjent konsesjonssøknaden om å bygge subseakabler til Tyskland og Storbritannia. De sistnevnte kablene skal bli på 1.400 mega watt [MW] hver. Kabelen til Tyskland planlegges å være i drift allerede i 2018. Slike kabler gjør at tysk vindkraft blir tilgjengelig for norske forbrukere, og norsk vannkraft kan eksporteres til Tyskland.

Subseakabler kan også brukes til å overføre elektrisitet som trengs for å drive en Subsea oljeplattform. En vanlig løsning er at slike subseaplattformer får elektrisitet fra en gassturbin på havoverflaten. En bærekraftig fremtid krever økt bruk av fornybar energi, og i vannkraftnasjonen Norge blir det forsket på hvordan energi kan overføres fra land via subseakabler til offshore installasjoner. Subseakabler kan også brukes til å frakte energien produsert av offshore vindmølleparker inn til forbrukere på land.

For å sikre økt forsyningsikkerhet er det viktig å undersøke hvilke komponenter i overføringen som er utsatt for havari, og designe disse på en slik måte at sannsynligheten for uønskede utkoblinger blir minimal.

## 1.2 Subseakonnektoren

En subseakonnektor er et komplekst isolasjonssystem som inneholder blant annet silikon og olje, i tillegg til andre komponenter og materialer som gjør den utsatt for havari. Elektrisk trevekst er en av de vanligste årsakene til degradering i elektriske felt med vekselstrøm [2]. Figur 1.1 viser prinsippet for subseakonnektoren, og denne skal ikke slippe inn vann ved åpning og lukking på havbunnen. Silikon (SiR) er et egnet materiale som membran brukt til å sripe vann av kontakten etter lukking under vann. Etter lukking vil det likevel være en tynn film av vann på kontakten merket receptacle i figur 1.1, og oljen er med på å absorbere dette vannet. Vann inne i konnektoren er et stort problem, fordi det svekker de elektriske egenskapene til isolasjonsmaterialene.



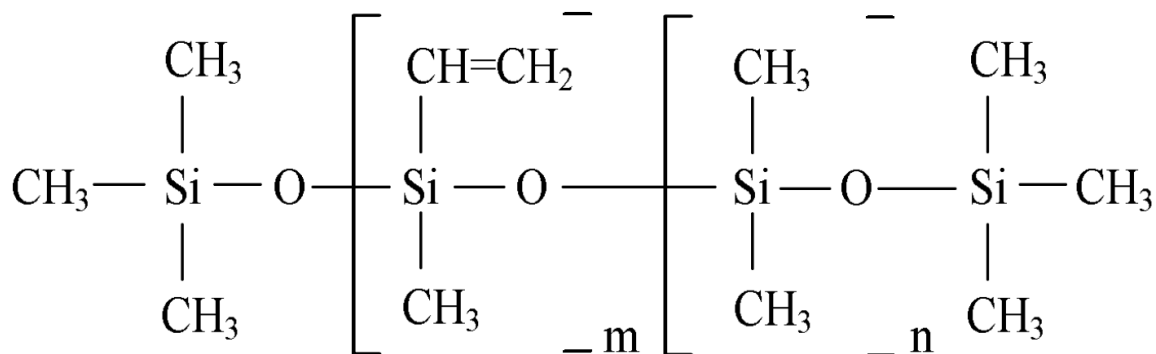
Figur 1.1: Prinsippskisse for en subseakonnektor [3].

En del av denne oppgaven vil være å finne ut mer om hvilken effekt olje har på elektrisk trevekst i silikon. Siden subseakonnektoren befinner seg på vanddybder som gir store hydrostatiske trykk skal det også undersøkes hvilken effekt trykket har på elektrisk trevekst i silikonisolasjonen. For å finne ut mer om dette vil det være naturlig å undersøke hvordan oljen som blir brukt i subseakonnektorer diffunderer inn i silikon. Dette kan brukes til å regne



ut hvor raskt silikonet blir mettet med olje, og dette er viktig for å være sikker på at silikonet som skal brukes i forsøk med elektrisk trevekst faktisk er mettet med olje.

Grunnen til at isolasjonsmaterialet silikon ble valgt er at det er et relativt mykt materiale. Dermed vil trolig effekten av det hydrostatiske trykket være større enn for et hardere materiale som f.eks. epoksy, som også blir brukt som isolasjon i subseakonnektoren. Diffusjon av olje vil foregå med ulik hastighet i disse to isolasjonstypene, siden de har ulike molekylsammensetninger [4]. Fra før er det forsket mye på elektrisk trevekst i polymerer som PE, XLPE og epoksy, men det har ikke vært like stort fokus på silikon. Silikon består hovedsakelig av Si-O bindinger. Det betyr at det er mye mindre karbon i silikon enn i XLPE, som er det materialet som det finnes mest data på når det gjelder elektrisk trevekst [5]. Det kan derfor ikke forventes at treveksten vil foregå på samme måte i silikon som i andre typer isolasjon som inneholder mye karbon [6]. En vanlig olje brukt i subseakonnektoren er den syntetiske esteren Midel RT 7131, og det er kun denne oljen som har blitt brukt i alle eksperimenter gjennomført i forbindelse med denne masteroppgaven. Det ble kun brukt vekselspanning, og alle spenninger er oppgitt i RMS-verdi.



Figur 1.2: Strukturformel for silikon [5].

## 1.3 Hypoteser

Hovedfokuset i denne masteroppgaven vil være å bygge et testoppsett for å studere elektrisk trevekst i silikon. Det skal studeres elektrisk trevekst i silikon som er mettet med olje og silikon som ikke har vært i kontakt med olje. Disse vil også bli omtalt som våte og tørre testobjekter. Begge typer testobjekt skal testes med og uten 50 bar væsketrykk, så det skal i alt gjennomføres 4 typer tester når det gjelder elektrisk trevekst.

For å finne ut mer om hvordan oljen påvirker silikonet og den elektriske treveksten vil det også være nødvendig å gjennomføre andre typer eksperimenter. Det er nødvendig å gjennomføre eksperimenter med diffusjon av olje inn i silikon for å være sikker på at testobjektet blir mettet med olje. Det er også relevant å undersøke om de mekaniske egenskapene til silikonet påvirkes av oljen.

Hypotesene som skal undersøkes er:

1. Gjennomslagsspenningen er høyere for silikon som er mettet med olje enn silikon som ikke inneholder olje. Dette gjelder ved:
  - (a) Atmosfærisk trykk
  - (b) 50 bars væsketrykk
2. Det elektriske treet initieres ved en høyere spenning i silikon som er mettet med olje enn silikon som ikke inneholder olje. Dette gjelder ved:
  - (a) Atmosfærisk trykk
  - (b) 50 bar væsketrykk
3. Det elektriske treet vokser med jevn hastighet i lengderetningen i isolasjonen for alle 4 typer tester for elektrisk trevekst. Dette gjelder ved langtidstesting med konstant spenning etter det elektriske treet er initiert.
4. Oljen forandrer de mekaniske egenskapene til silikon som er 100 % mettet med olje.

Teorien som danner grunnlaget for disse hypotesene er nærmere beskrevet i kapittel 2. Masteroppgaven er begrenset til å gjøre eksperimenter som er nødvendige for å teste hypotesene.

## Teori

Elektrisk trevekst er en av hovedårsakene til degradering av polymerer i elektriske felt med vekselstrøm [2]. Treveksten formes som følge av partielle utladninger, og trevekstutviklingen bestemmer aktiviteten til de partielle utladningene. Både trevekst og partielle utladninger (PD) bestemmes blant annet av frekvens og størrelsen til påtrykt spenning, geometrien til elektroden, egenskapene til isolasjonen og temperatur [7]. For å forstå fenomenet elektrisk trevekst er det derfor viktig å betrakte både PD og trevekst samtidig [7]. Det er vanlig at olje diffunderer inn i isolasjonen i subseakonnektorer, og denne oppgaven søker bla. å finne ut mer om hvordan olje i isolasjonen påvirker elektrisk trevekst.

### 2.1 Diffusjon

For å måle opptaket av olje i polymerisolasjon kan man bruke en metode som kalles "Mass Uptake Measurement" [4]. Når olje diffunderer inn vil vekten av testobjektet øke. Testobjektet blir veid før det kommer i kontakt med oljen (tørrvekt), og det er mulig å finne relativt masseopptak,  $m_r(t)$  ut ifra ligning 2.1. Metoden er nærmere beskrevet i kapittel 3.2.

$$m_r(t) = \frac{m(t) - m_c}{m_0} \quad (2.1)$$

Relativt masseopptak regnes ut fra testobjektets masse  $m(t)$ , tørrvekt  $m_0$  og tørket vekt av prøveobjektet  $m_c$ . Hvis det ikke finnes vann i prøveobjektet fra før er  $m_c = m_0$  [4, 8].

En tilnærmet formel for opptaket av olje i midten av isolasjonen når diffusjon forekommer på begge sider av testobjektet ved konstant temperatur [8] er gitt av ligning 2.2. Denne ligningen

sier at mye olje vil diffundere inn i prøven initialt, og diffusjonshastigheten avtar omvendt eksponentielt med tiden.

$$G = 1 - \exp \left[ -7.3 * \left( \frac{D_x * t}{s^2} \right)^{0.75} \right] \quad (2.2)$$

$D_x$  er diffusjonskonstanten,  $s$  er tykkelsen på testobjektet og  $t$  er tiden fra testobjektet blir nedlagt i olje. Ligning 2.2 kan brukes for å finne en tilnærmet verdi på diffusjonskonstanten. Forskjellige verdier for  $D_x$  kan settes inn i ligning 2.2, helt til grafene av funksjonene gitt av ligning 2.2 og 2.1 overlapper hverandre. Tiden det tar til å oppnå minst 99% av maksimum metning av prøven [8] er gitt av ligning 2.3.

$$t_m = \frac{0.67 * s^2}{D_x} \quad (2.3)$$

Ligning 2.3 kan brukes til å finne et estimat på hvor lenge et testobjekt må ligge i olje for at det skal bli mettet. Formel 2.2 og 2.3 forutsetter at oljen hovedsakelig diffunderer inn gjennom de store flatene til testobjektet, og at diffusjonen inn gjennom kantene er minimal [8]. I denne oppgaven vil ikke alle testobjekter ha store overflater sammenlignet med tykkelsen. Alle testobjektene vil imidlertid ha like stor størrelse, og diffusjonskonstanten som blir funnet kan brukes i ligning 2.3 for å få et bra estimat på hvor lenge testobjektene må ligge i olje for at det skal bli mettet.

Tiden det tar fra testobjektet legges i olje til det blir mettet avhenger i stor grad av temperaturen [9]. Ved høyere temperaturer vil den indre kinetiske energien øke, og molekylene beveger seg raskere enn ved lavere temperaturer. Dette fører til at løseligheten i stoffene øker, og det blir mer fritt rom i isolasjonen [9]. Dermed kan mer olje diffundere inn i isolasjonen, og opptaket går raskere. Hvis isolasjonen er mettet ved høy temperatur vil den bli overmettet når det kjøles ned, og siden det blir mindre fritt rom i isolasjonen vil oljen da begynne å diffundere ut [9]. Diffusjonshastigheten varierer med temperaturen, og dermed vil også diffusjonskonstanten være forskjellig ved ulike temperaturer [4].

## 2.2 Partielle Utladninger

Partielle utladninger (PD) er lokale delvise dielektriske sammenbrudd mellom to elektroder i et isolerende medium [10]. Når det lages isolasjon er det veldig vanskelig å unngå at isolasjonen blir helt fri for gasslommer. Disse kan forekomme i selve isolasjonen, men det er også veldig vanlig at slike hulrom danner seg i grensesjiktet mellom elektroden og isolasjonen. PD kan forekomme på steder i isolasjonen der den elektriske feltstyrken er stor i forhold til området rundt. Dette vil typisk være i hulrom, siden gassfylte hulrom har lavere holdfasthet enn isolasjonen. Utladning oppstår dersom den elektriske feltstyrken er større enn holdfastheten til gassen i hulrommet [10]. I følge Paschens lov vil holdfastheten til luft avhenge av gasstrykket og størrelsen til hulrommet [10].

Ved AC spenning vil PD forekomme minst en gang per halve periode og gradvis svekke isolasjonen. Denne svekkelsen kan skje på tre måter [10]:

1. Elektronskred som følge av at isolasjonen blir bombardert med ioner og elektroner i trevekstkanalen etter at PD har forekommet.
2. Kjemisk reaksjon på grunn av temperaturøkning.
3. Stråling fra utladningene. UV stråling har nok energi til å bryte bindinger i organiske materialer.

I tillegg har det blitt foreslått [11] at Maxwellkrefter svekker holdfastheten til polymeriske materialer. Maxwellkreftene vil rive bindinger fra hverandre inne i molekylet, og er en tregere degraderingsprosess enn de overnevnte. Når det gjelder elektrisk trevekst vil de nevnte fenomenene forekomme om hverandre. Dette er en av grunnene til at det ikke eksisterer en kvalitativ teori om hvordan trekanaler utvikler seg [7].

## 2.3 Elektrisk Trevekst

Elektrisk trevekst er en av de vanligste aldringsmekanismene for isolasjon. Dette kan forekomme som følge av elektronisk, kjemisk, termisk, mekanisk eller elektromagnetisk aldring, men felles for alle disse fenomenene er at det må være et elektrisk felt tilstede som overgår isolasjonsmaterialets tåleevne [12]. Veksten vil forekomme i retningen av det påtrykte feltet. Hvis den ledende kanalen når gjennom hele isolasjonen og skaper en forbindelse mellom høyspenningselektroden og jord kan gjennomslag inntreffe. Det er flere fenomener som virker inn på trevekstens utvikling, og det er vanlig å dele inn denne prosessen i tre stadier: Initiering, vekst og gjennomslag [13].

### 2.3.1 Initiering

Initieringsfasen beskriver tiden fra det elektriske feltet overgår en grenseverdi til det begynner å utvikles et elektrisk tre [12]. I denne fasen vil PD forekomme i veldig små hulrom i isolasjonen. For sfæriske gassfylte hulrom som opptar en liten del av isolasjonen vil det maksimale elektriske feltet være

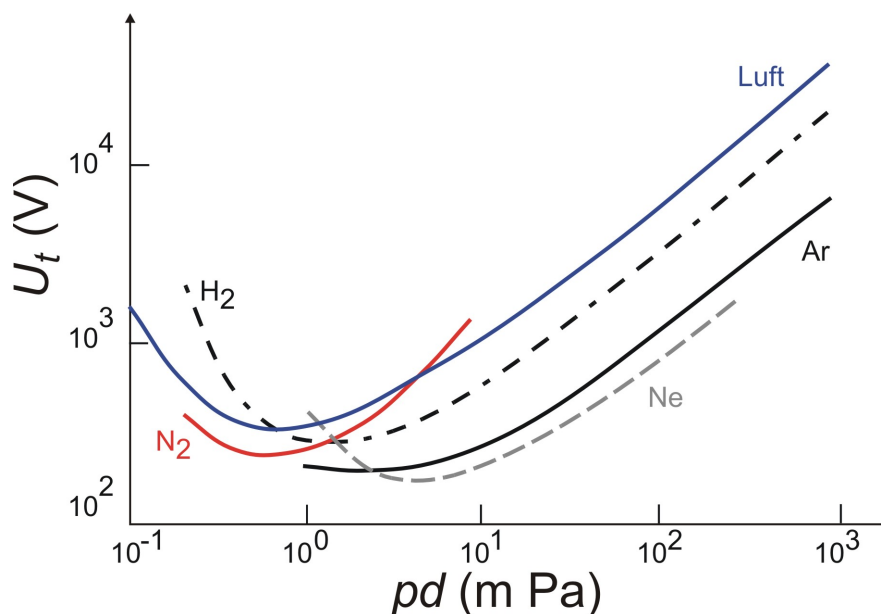
$$E_h = \frac{3 * \epsilon_r}{1 + 2 * \epsilon_r} * E \quad (2.4)$$

der  $E$  er det elektriske feltet uten hulrom, og  $\epsilon_r$  er den relative permittiviteten til isolasjonen [10]. Det elektriske feltet i hulrommet vil øke ved høyere permittivitet, men feltstyrken i hulrommet vil maksimalt være 1,5 ganger høyere enn feltstyrken i isolasjonen. For fastestoffer er den relative permittiviteten alltid større enn 2 [10], og dermed vil det oppstå lokale feltforsterkninger i hulrommene. De gassfylte hulrommene i isolasjonen er ikke nødvendigvis kuleformet, så ligning 2.4 er en sterk forenkling av virkeligheten. Hvilken av PD mekanismene beskrevet i avsnitt 2.2 som forekommer vil avhenge av type isolasjon, graden av urenhet og mekanisk påkjenning [2].

### 2.3.2 Vekst

I vekstfasen vil den målbare energien fra PD aktiviteten drive den elektriske treveksten. Det dannes tynne, ledende kanaler gjennom isolasjonen. Under denne prosessen vil ledningsevnen til kanalen forandre seg, og derfor vil PD aktiviteten variere i det elektriske treet. I vekstfasen er det vanlig at isolasjonen spaltes opp i karbon (C), Hydrogen ( $H_2$ ) samt

en liten mengde andre gasser avhengig av hvilken isolasjon som blir brukt [12]. Karbonet som legger seg langs kanten av hulrommet vil være med på å bestemme ledningsevnen til trekanalen. I tillegg vil spaltingen gjøre at trykket i gasslommen varierer. Som nevnt i avsnitt 2.2 vil holdfastheten avhenge av gasstrykket og størrelsen til hulrommet. Paschenkurven gitt i figur 2.1 viser sammenhengen mellom gjennomslagsspenningen og produktet mellom trykk og avstand mellom elektrodene i noen gasser.



Figur 2.1: Paschenkurve [14].

Som figur 2.1 viser vil en økning eller minskning av produktet mellom trykk og avstand rundt minimumspunktet gjøre at holdfastheten til gassen øker. Siden trykket hele tiden varierer inne i trekanalen i vekstfasen, vil treveksten forekomme med variabel hastighet.

### 2.3.3 Gjennomslag

Når det etableres en ledende kanal fra høyspenningselektroden til jord vil det bli gjennomslag i isolasjonen. Gjennomslagsfasen kjennetegnes med en sterk økning i strømmen og forkulling som utvider kortslutningskanalen til det mangedobbelte av trekanalen [12]. Tidligere forskning viser at gjennomslag kan forekomme med en gang første trekanal når jord, men det er også vanlig at det etableres flere trekanaler til jord før det blir gjennomslag i en av dem [7]. Grunnen til at gjennomslag ikke nødvendigvis inntreffer umiddelbart etter den første trekanalen når jordelektroden, er at det er stor motstand i trekanalen. Det kan sees av Paschenkurven at holdfastheten til gassen øker når trykket inne i trekanalen øker. Mengden

karbon er med på å bestemme motstanden i trekanalen, og tid til gjennomslag bestemmes blant annet av isolasjonstypen [7]. Gjennomslag vil inntreffe når holdfastheten til gassen i trekanalen overskrides, og det oppstår en kortslutning mellom elektrodene [2]. For silikon er det vanlig at kortslutning oppstår med en gang første trekanal når jord [13].

### 2.3.4 Innvirkning av spenning og frekvens

Som nevnt tidligere kan energien fra de partielle utladningene drive treveksten gjennom isolasjonen. Hvis vi får  $n$  like store utladninger per halve periode med AC spenning vil dissipert effekt  $W$  være lik [15]:

$$W = n\sqrt{2}q_a U_i f \quad (2.5)$$

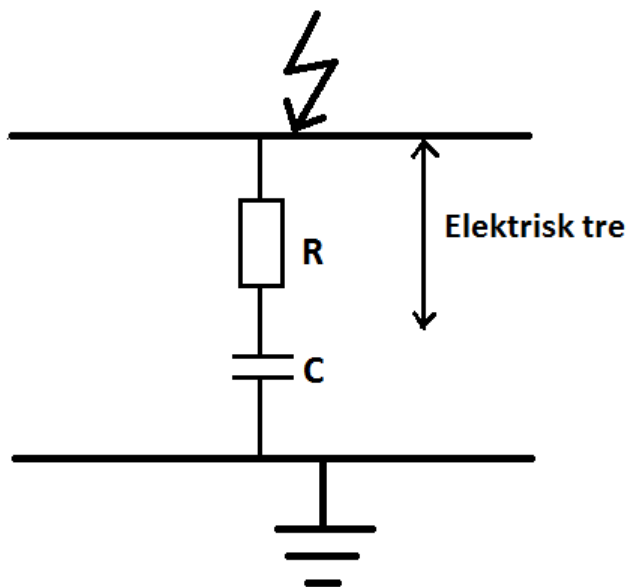
Der  $q_a$  er amplituden til tilsynelatende ladning,  $U_i$  er RMS verdien til spenningen ved dannelse av PD og  $f$  er frekvensen. Generelt vil  $n$  være proporsjonal med forholdet mellom påtrykket spenning over trekanalen  $U_{tre}$ , spenningsfallet for hver utladning  $\Delta U_{pd}$  samt en proporsjonalitetsfaktor  $K$  slik at [2, 15]:

$$n = K \frac{U_{tre}}{\Delta U_{pd}} \quad (2.6)$$

Disse størrelsene er veldig vanskelig å måle. Det er imidlertid mulig å benytte en RC-krets analogi for å finne forholdet mellom  $U_{tre}$  og  $\Delta U_{pd}$ . Man ser da på trekanalen som en sylindrisk motstand slik at spenningen over den er  $U_{tre}$ . Den delen av isolasjonen trekanalen ikke har nådd representeres med en kapasitans  $C$  som figur 2.2 viser. Forholdet mellom  $U_{tre}$  og spenningen over testobjektet  $U_0$  vil da være [15]:

$$\frac{U_{tre}}{U_0} = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{1}{(2\pi f RC)^2}}} = A(f) \quad (2.7)$$





Figur 2.2: RC-krets analogi for elektrisk trevekst.

Ved å kombinere likning 2.5, 2.6 og 2.7, samt sette tennspenningen  $U_i$  lik påtrykket spenning  $U_0$  kan følgende utledes:

$$W = K' A(f) q_a U_0^2 f \quad (2.8)$$

Der  $K'$  er en konstant som avhenger av størrelsen på hulrommet og det elektriske treet [15]. Likning 2.8 sier at dissipert effekt per utladning øker lineært med amplitudeverdien til tilsynelatende ladning, frekvens og kvadratet av påtrykt spenning. Fra likning 2.8 kan man se at det elektriske treet vil vokse mer både i lengde og bredderetning ved økt spenning eller frekvens.

### 2.3.5 Oljens innvirkning på elektrisk trevekst

En metode som kan brukes til å rehabilitere kabler etter feil er å pumpe silikonolje (CableCure) inn i lederen. Videre kobles to av de tre lederne i parallell og brukes som returleder for strømmen som brukes til å varme kabelen. Til slutt brukes infrarød spektroskopi til å undersøke om silikonoljen har fordelt seg jevnt i isolasjonen.

Det har blitt gjennomført forsøk med elektrisk trevekst på den rehabiliterte isolasjonen som viser at det er 63 % sannsynlighet for at holdfastheten er 2,5 ganger høyere enn verdien før rehabilitering [16]. Forsøk gjennomført av E.Ildstad og H.Faremo viser at gjennomslagsstyrken øker med en faktor på 2.1 i XLPE kabelisolasjon [17].

Alle eksperimenter nevnt over i dette avsnittet gjelder vanntrevest. Det har ikke lyktes undertegnede å finne teori om hva som gjør at olje påvirker elektrisk trevekst i silikon eller andre isolasjonsmaterialer brukt i subseakonnektoren. Det er et område det må forskes mer på, siden subseakonnektoren og noen subseakabler inneholder olje. Resultater fra eksperimenter gjennomført i prosjektoppgaven [1] viser at gjennomslagspenningen er noe høyere i epoksy som inneholder olje i forhold til epoksy som ikke inneholder olje, uten at det lyktes å finne ut hvorfor. Det ble imidlertid foreslått at oljen fyller opp de gassfylte hulrommene i isolasjonen når silikonet blir mettet med olje. Da kan gjennomslagspenningen øke siden olje har høyere holdfasthet enn gasser [10].

### 2.3.6 Mekaniske egenskaper

I støpeprosessen vil det oppstå indre mekaniske krefter i isolasjonen på grunn av forskjellige temperaturer og ulik varmeledningsevne i isolasjonen og lederen. Ofte brukes omgivelsestemperaturen til avkjøling etter støping. Den delen av isolasjonen som er lengst fra lederen vil da avkjøles først, og det er under denne prosessen det dannes lag med ulike interne spenninger [12]. PP og PEX isolasjon krever temperaturer opp til 200 °C ved pressing etter støpeprosessen, og i disse typer isolasjon vil det oppstå relativt store indre mekaniske krefter hvis ikke isolasjonen avkjøles sakte. Når det gjelder silikon foregår herdingen i støpeformen på 100- 170°C, og etterherdingen foregår på 200°C. Et forsøk med forspente fibre i epoksy konkluderer med at trykkrefter motvirker trevekst, mens strekkrefter svekker motstandsstyrken i isolasjonsmaterialet [12, 18]. Undersøkelsene gjort i [18] viser ikke bare at holdfastheten øker med interne trykkrefter. Det elektriske treet utvikler seg også med lavere

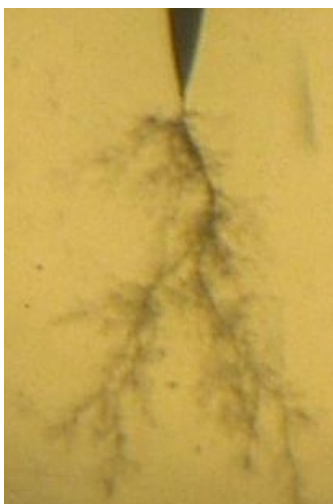
hastighet. Effekten av hydrostatisk trykk på elektrisk trevekst i silikon er presentert senere i dette kapitlet.

Det har ikke lyktes å finne teori om hvordan olje forandrer de mekaniske egenskapene til silikon eller andre polymerer. Det har tidligere blitt gjennomført forsøk med strekkrefter på silikon ved Sintef ENERGI. Det har ikke blitt publisert en artikkel fra disse forsøkene på nåværende tidspunkt, men personene som gjennomførte disse forsøkene hadde heller ikke et entydig svar på hva oljen gjør med polymerer. Det kan imidlertid tenkes at oljen tar opp plass mellom molekylene i silikonene og gjør disse bindingene svake. En annen mulighet er at oljen bryter opp bindingene inne i silikonet.

### 2.3.7 Vekst og struktur

#### Buskvekst

Buskvekst vil typisk forekomme ved høy frekvens og høyt felt. Flere grener vil typisk springe ut fra nålspissen, og når buskveksten stagnerer er det vanlig at en enkel gren bryter ut av busken og finner veien til jordelektroden [19].

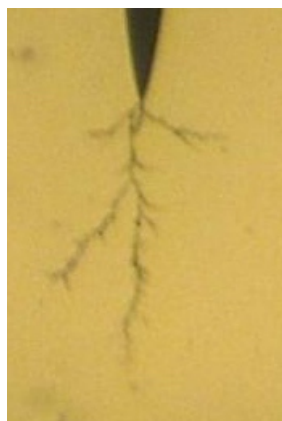


Figur 2.3: Buskvekst ved 8 kV i tørr silikon under langtidstesting. Avstand mellom elektrodene er 2 mm og trykket er atmosfærisk.

#### Grenvekst

Grenvekst kjennetegnes ved at en hovedgren med noen utstikkere dannes gjennom isolasjonen. Det er vanlig at grenveksten har en jevn vekstrate gjennom hele isolasjonen,

og grenvekst forekommer oftest ved høye spenninger [19].



Figur 2.4: Grenvekst ved 11 kV i tørr silikon under step-up test. Avstand mellom elektrodene er 2 mm og trykket er 50 bar.

### 2.3.8 Innvirkning av hydrostatisk trykk

Siden en subseakonnektor befinner seg på havbunnen vil den være utsatt for hydrostatiske trykkrefter. Det hydrostatiske trykket øker proporsjonalt med vanddybden etter ligning 2.9.

$$P = \rho * g * h \quad (2.9)$$

P er trykket i pascal (Pa),  $\rho$  er vanntettheten, g er tyngdeakselerasjonen og h er vanddybden [20]. Pascal er en avledet SI-enhet og måles i  $\frac{N}{m^2}$ . Et trykk på 1 atmosfære tilsvarer 101,325 kPa eller 1,013 bar [20]. Det er vanlig å forenkle og si at 1 bar tilsvarer atmosfærisk trykk, og det vil også bli gjort i denne oppgaven.

Som nevnt tidligere er hastigheten til det elektriske treet avhengig av PD aktiviteten, som igjen er avhengig av trykket i gasslommene i isolasjonen. Hvis konnektoren blir utsatt for et veldig høyt hydrostatisk trykk kan det føre til at trykket i gasslommene i isolasjonen øker så mye at isolasjonen sprekker opp, og sprekker vil føre til lavere holdfasthet i isolasjonen [21].

På en annen side vil et økt trykk i gasslommene føre til at holdfastheten til gassen øker, noe som kan sees av Paschen kurven. Isåfall vil isolasjonen tåle et høyere elektrisk felt. Det eksterne trykket vil føre til økt trykk i gasslommene for myke materialer som klemmes sammen. Det er her viktig å skille mellom eksternt gasstrykk og eksternt væsketrykk. Et eksternt gasstrykk på f.eks. 50 bar vil trenge inn i hulrommene i isolasjonen og føre til at trykket blir 50 bar også inne i hulrommene. Et eksternt væsketrykk vil klemme sammen isolasjonen hvis den er myk, men trykket inne i hulrommene i isolasjonen vil være mye lavere enn 50 bar. Hvis isolasjonen

blir utsatt for hydrostatisk trykk i lengre tid kan også mer av det eksterne trykket diffundere inn i gasslommene i isolasjonen [21].

Silikon er et relativt mykt materiale der ytre trykkrefter vil påvirke trykket i gasslommene inne i isolasjonen. Det har blitt gjennomført forsøk for å studere effekten av hydrostatisk trykk på elektrisk trevekst i en silikon-kabelskjøt som viser at holdfastheten til silikonisolasjonen er høyere ved økende trykk [21]. Resultatene viser også at spenningen ved begynnende PD aktivitet er høyere ved trykk på mellom 1 og 50 bar. Lignende forsøk viser at hydrostatisk trykk motvirker elektrisk trevekst også i polyetylen (PE) [22].

---

## Eksperimentelt

### 3.1 Testobjektene

For å gjøre eksperimenter med elektrisk trevekst og diffusjon i silikon ble det først laget testobjekter. For å få de høye elektriske feltene som trengs for å få trevekst i isolasjonen ble det støpt inn en nål som ble tilkoblet høyspenningsselektroden. Nålen etterligner en ruhet i lederen som f.eks. en skarp spiss eller kant som gir en lokal forsterkning i det elektriske feltet. Produksjonsmetoden for testobjektene som ble laget er nærmere beskrevet i dette kapitlet. Mot slutten av kapitlet er også målemetodene som ble brukt under eksperimentene beskrevet.

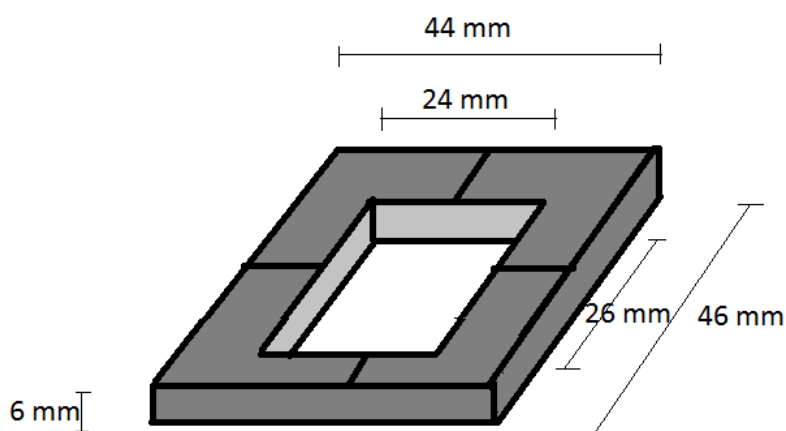
#### 3.1.1 Klargjøring av silikon før støping

For å klargjøre silikon til støping ble en koppformet beholder først rengjort med isopropanol. Dette ble gjort for å forhindre at det ble rusk eller andre forurensinger i silikonet som ble blandet i beholderen. Deretter ble silikonmaterialene Elastosil LR 3003/60 A og Elastosil LR 3003/60 B blandet sammen i et 50:50 forhold. Den koppformede beholderen som ble fylt med blandingen ble plassert i et vakumskap i 3 timer for å redusere luftinnholdet i silikonet. En visp rørte konstant i beholderen inne i vakumskapet for å drive luft ut av blandingen. Etter 3 timer ble silikonet ført over i en sprøyte. Siden silikonet ble tatt ut av vakumskapet for å føres inn i sprøyten, ble sprøyten satt inn i vakumskapet igjen i 1 time for å drive ut luften som ble blandet inn under overføringen. Etterpå var silikonet uten luft klar til å bli ført inn i en støpeform for å lage testobjekter.

### 3.1.2 Støpeprosess og bearbeiding

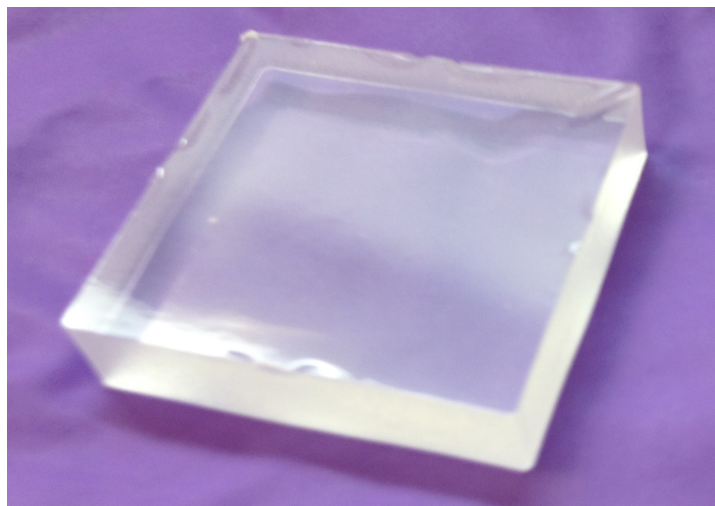
#### Testobjekt for Diffusjon av Olje

En skisse av støpeformen som ble laget for å lage testobjekter av silikon til diffusjonseksperimentet er vist i figur 3.1. Formen ble lagt på et lag med pet-folie som ble rengjort med isopropanol. Det klargjorte silikonet ble så ført fra sprøyten og inn i midten av formen. Et nytt rengjort lag med pet-folie ble deretter lagt over den fylte formen. Formen med pet-foliene ble deretter lagt i en presse med varmeelementer på klemmene. Sporene på overflaten vist i figur 3.1 ble frest ut for å lede ut overflødig silikon under pressing. Det ble presset med en tyngde på 5 tonn (ca. 50 kN) i 2 minutter. Deretter ble tyngden økt til 25 tonn (ca. 25 kN) i 12 minutter. Temperaturen på klemmene i pressen ble gradvis økt til 165°C under hele prosessen. Deretter ble pressen kjølt ned til 30°C på 10 minutter mens tyngden fortsatt var 25 tonn. For å tåle disse kreftene ble støpeformen laget av stål. Hvis den hadde blitt laget av aluminium ville den blitt deformert i pressen. Det pressede testobjektet ble tatt ut av formen og etterherdet på 200°C i 4 timer. Testobjektet av silikon ble da klart til å bli senket ned i olje.



Figur 3.1: Støpeform for silikon diffusjonstestobjekt laget av stål.

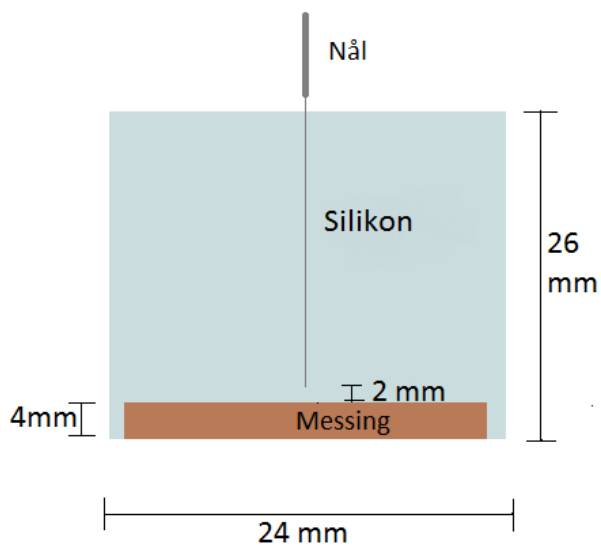




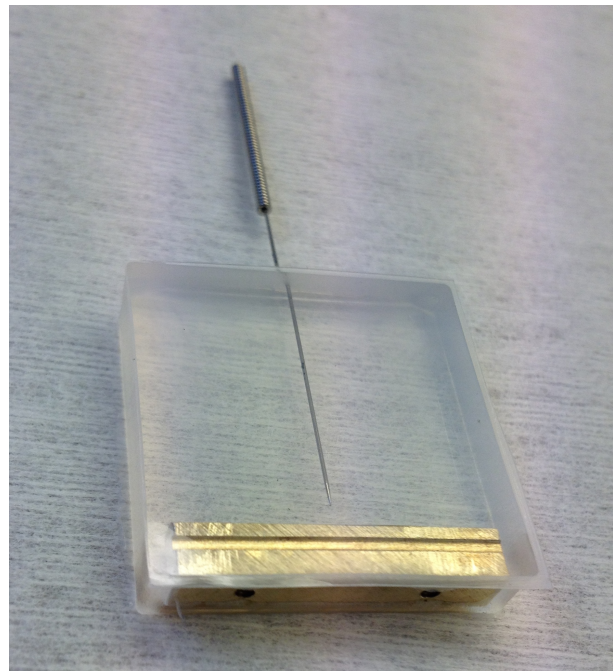
Figur 3.2: Bilde av diffusjonstestobjekt.

### Testobjekt for elektrisk trevekst i silikon

Støpeformen som er avbildet i figur 3.4a ble fylt med silikon for å lage testobjekter for elektrisk trevekst. Som jordelektrode ble det brukt en 4x4 mm messingstav som ble kuttet opp i lengde på 22 mm og plassert i bunnen av støpeformen. Delen av messingbiten som vendte inn mot silikonet ble polert ned, og kanter ble avrundet slik at det ikke ble lokale feltforsterkninger i disse områdene. Resten av messingbiten ble pusset med grovt sandpapir slik at den lettere festet seg til silikonet langs sidene av messingbiten. Denne ble så festet til bunnen av støpeformen ved hjelp av to skruer som gikk gjennom bunnen av formen og inn i messingingen. Da nålen var festet som vist i figur 3.4a var støpeformen klar for å bli fylt med ferdigblandet silikon. Det ble forsøkt å legge formen i samme presse som ble brukt for å lage testobjekter til diffusjonseksperimentet. Det viste seg da at nålen ble bøyd ut av testobjektet. Det ble derfor laget en alternativ presse der silikonet ble presset sammen ved hjelp av en stålplate, lexanglass og bolter som vist i figur 3.4b. Lexanglasset var så tykt at det ikke ble sprekker da boltene ble skrudd fast. Nålen ble trykket inn i formen etter sammenpressing for at den ikke skulle bli bøyd. Avstanden fra nålen til messingbiten ble justert til 2 mm med en nøyaktighet på  $\pm 0.2$  mm. Et mikroskop med measure funksjon ble brukt for å være sikker på at avstanden mellom elektrodene ble nøyaktig før støping. For å forsikre seg om at avstanden var innenfor nøyaktighetsmarginen ble denne også sjekket etter støping. Deretter ble støpeformen med silikon herdet på  $100^{\circ}\text{C}$  i en time. Testobjektet ble så lirket forsiktig ut av støpeformen for at messingelektroden eller nålen ikke skulle løsne. Til slutt ble testobjektet etterherdet på  $200^{\circ}\text{C}$  i 4 timer.

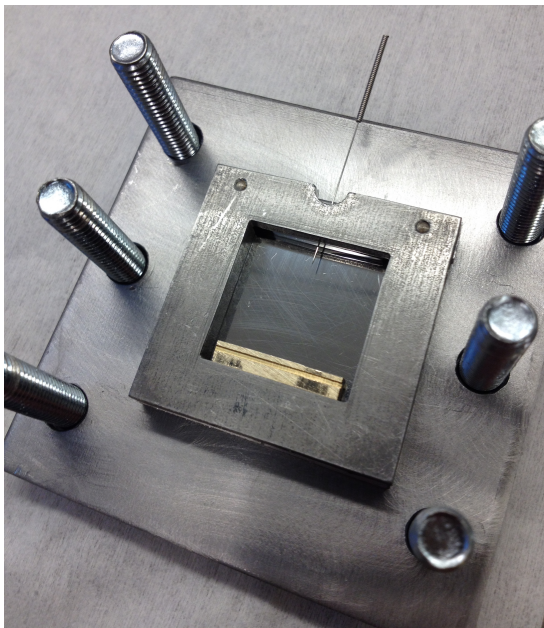


(a) Skisse av testobjekt.

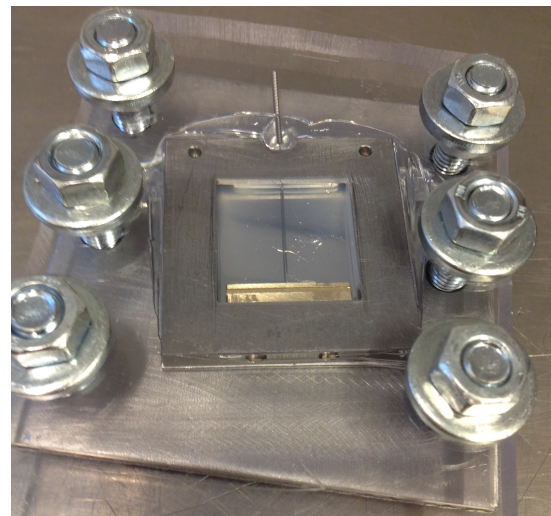


(b) Bilde av testobjekt.

Figur 3.3: Ferdig testobjekt for elektrisk trevekst. Tykkelsen er 6 mm.



(a) Støpeformen er klar for silikon.



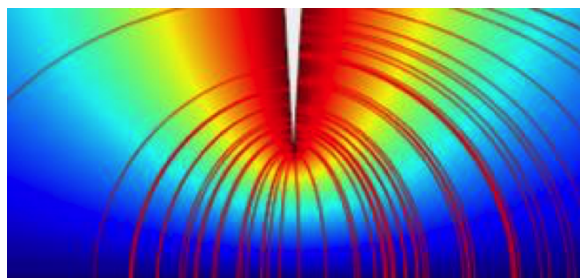
(b) Støpeformen klar for herding.

Figur 3.4: Støpeform for testobjekt til elektrisk trevekst. Støpeformen ble presset sammen mellom en stålplate og en plate av leksanglass. Stålplaten var 4 mm tykk, og leksanglasset var 10 mm tykt.

## Nålen

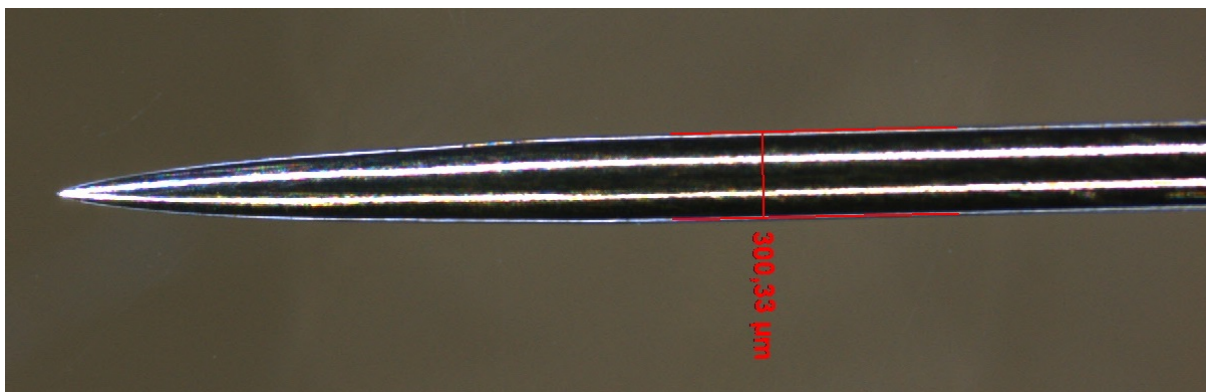
En viktig detalj var å pusse siden på nålen med sandpapir slik at den ikke løsnet fra isolasjonen etter støping. Det ble benyttet sterile akupunkturnåler med diameter på nålen ca. lik  $300 \mu\text{m}$  slik figur 3.6 viser. Vinkelen til nålspissen ble målt til 30 grader mellom nålsiden og aksial retningen til nålen.

Nålspissen kan sees på som en kule med veldig liten radius. Det elektriske feltet rett utenfor en kule har størrelsen  $|\mathbf{E}| = \frac{V_0}{a}$ , der  $V_0$  er påtrykket spenning og  $a$  er radiusen til kula [23]. Det vil si at for et gitt potensial vil det elektriske feltet utenfor kula være stort dersom radiusen er liten, og motsatt. Det at en leder er spiss gjør at det elektriske



Figur 3.5: Simulert elektrisk felt i et nålplategap [12]. Feltlinjene er farget rødt, og ekvipotensiallinjene er i farger.

feltet rett utenfor lederen blir stort, slik at det vil bli gjennomslag der før andre steder [23]. Nålspissen er derfor en avgjørende komponent i testobjektet, og det ble tatt bilder av nålspissen i alle ferdigstøpte testobjekter for å se om tuppen på nålen hadde blitt deformert, eller om det ble dannet luftlommer ved nålspissen under støpeprosessen.

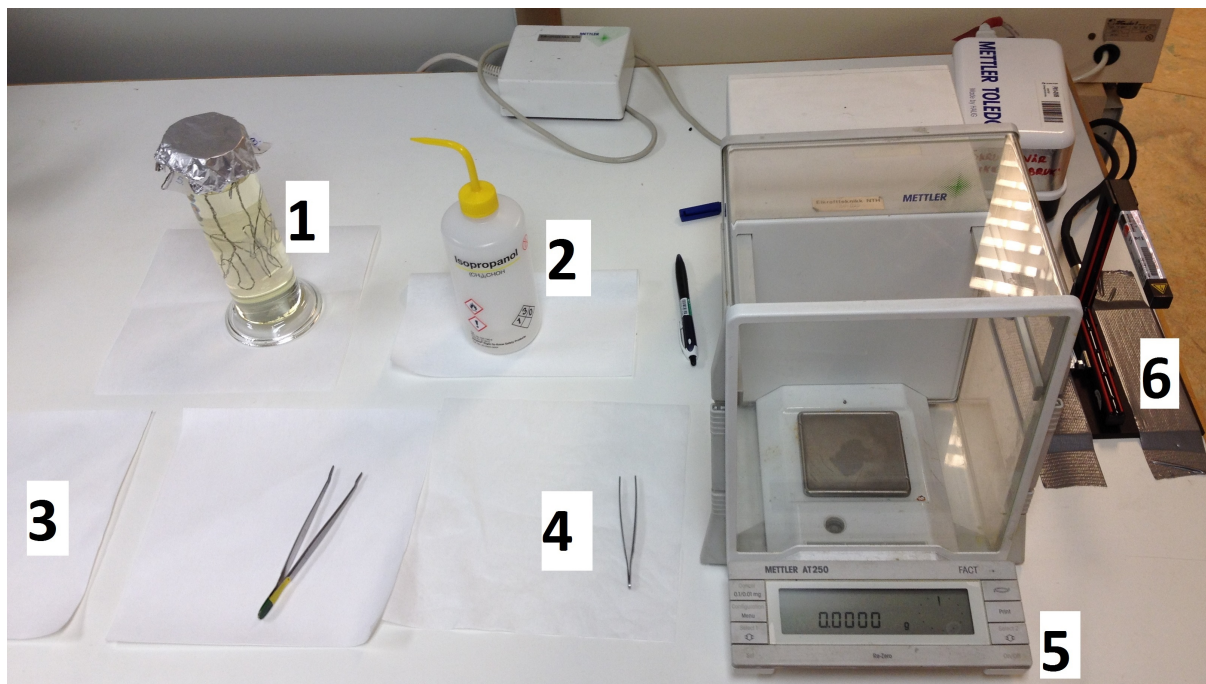


Figur 3.6: Bilde av nålspissen brukt i testobjekt for elektrisk trevekst.

## 3.2 Målemetoder

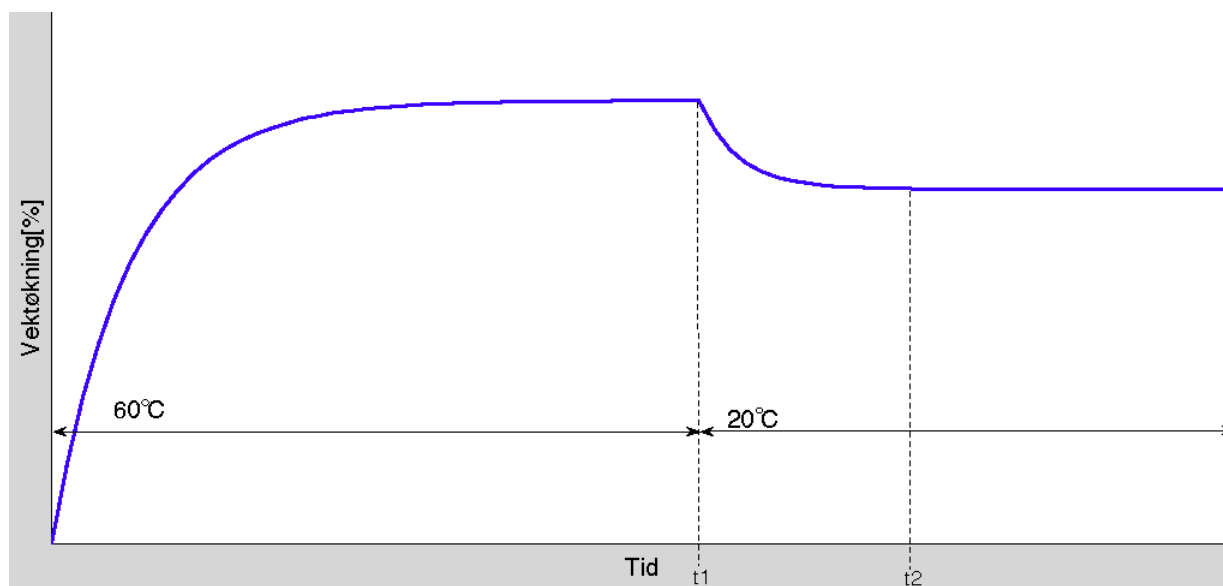
### 3.2.1 Diffusjon av olje

For å måle opptaket av olje i isolasjonen ble testobjektene veid med jevne mellomrom (Mass Uptake Measurement) [4]. Når oljen diffunderer inn i testobjektet vil vekten øke, og forandringen er målbar. Det er bare mulig å bruke denne metoden for væsker, siden tettheten til væsker er større enn tettheten til gasser. Testobjektene ble lagt i et glass med olje og holdt fast med en prøveholder som ble hengt over kanten på glasset. For å skille testobjektene ble disse nummerert. Da testobjektene skulle veies ble prøven tatt ut av prøveholderen med en pinsett og mesteparten av oljen tørket av på et papir. Deretter ble all oljen tørket av på et nytt papir. Det var viktig å ikke ta på prøven slik at man ikke fikk olje på hanskene, og det måtte tørkes olje av pinsetten underveis. Til slutt ble testobjektet rengjort med papir som var fuktet med isopropanol. Et nytt sterilt pinsett ble så brukt til å føre testobjektet gjennom en statisk utjevner før det ble lagt på vekten. For at målingene skulle bli nøyaktige var det nødvendig at testobjektet ikke hadde rusk eller oljedråper på overflaten, siden det kun var vektøkningen pga. oljen inne i testobjektet som skulle måles. Den statiske utjevneren sørget for at testobjektet ikke hadde statisk ladning, siden dette ville ha påvirket målemekanismen i vekten.



Figur 3.7: Måleoppsett for diffusjonseksperiment. På bildet er 1: Glass med olje og testobjekter. 2: Isopropanol. 3: Papir for avtørring av olje. 4: Pinsett. 5: Vekt som måler gram med fire desimalers nøyaktighet. 6: Elektrostatisk utjevner.

Det var viktig at det ikke gikk mer enn 1 minutt fra prøven ble tatt ut av oljen til den ble målt på vekten. Hvis det gikk lengre tid ville oljen få tid til å diffundere ut av prøveobjektet, og dette ville ha påvirket målingene [8]. Hensikten med diffusjonseksperimentet var å mette testobjektene med olje på en hurtig måte, samtidig som det måtte være sikkerhet i at testobjektene faktisk ble mettet med olje. Prøveglasset med olje og testobjekter ble derfor plassert inn i et varmeskap som holdt en temperatur på  $60^{\circ}\text{C}$ . Testobjektet var mettet med olje ved denne temperaturen da det ikke var forandring i vektøkningen. Da dette skjedde ble testobjektet tatt ut av varmeskapet og avkjølt til en romtemperatur på  $20^{\circ}\text{C}$ , siden det var ved denne temperaturen eksperimentene med elektrisk trevekst ble gjennomført. Fra teorien i kapittel 2.1 var det forventet at oljen ville diffundere ut ved lavere temperaturer, og det var forventet at oljeopptaket i testobjektene ville ha en form omtrent som vist i figur 3.8.



Figur 3.8: Teoretisk diffusjonsforløp. Tiden det tar til prøven er mettet ved  $60^{\circ}\text{C}$  er  $t_1$ , og ved tiden  $t_2$  er testobjektet mettet ved  $20^{\circ}\text{C}$ .

Da tidene  $t_1$  og  $t_2$  var kjent ble dette brukt til å lage oljemettede testobjekter for eksperimentene med elektrisk trevekst på en effektiv måte.

### 3.2.2 Elektrisk Trevekst

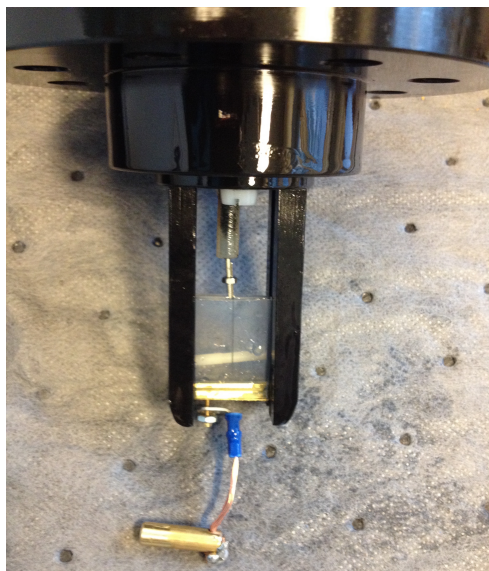
Den største delen av prosjektet ble å lage et oppsett som skulle brukes til å observere elektrisk trevekst under trykk. SINTEF Energi hadde bestilt en trykktank laget av rustfritt stål med seglass som er avbildet i figur 3.9. Tanken hadde i utgangspunktet mulighet for innsyn via fire vinduer. For å få gode bilder ble det besluttet å tette to av vinduene med blindflenser slik at et kamera kunne filme rett gjennom tanken som senere ble fylt med Midel RT 7131. De to vinduene ble holdt på plass ved hjelp av flenser med hull i midten og dobbel O-ringtetting. Det viste seg at hullene der vinduene skulle plasseres var 19,1 mm dype, mens vinduene målte 18 mm i lengden. For å få tanken tett var det nødvendig at vinduene lå i flukt med kanten ved O-ringene. Det ble derfor laget to ringer av PEEK (Polyetheretherketone) med 1,1 mm tykkelse og pumpespor som ble plassert mellom glasset og tanken for at den skulle bli tett. Det ble også bestilt O-ringer for å tette tanken i bunnen, lokket og de to blindflensene.



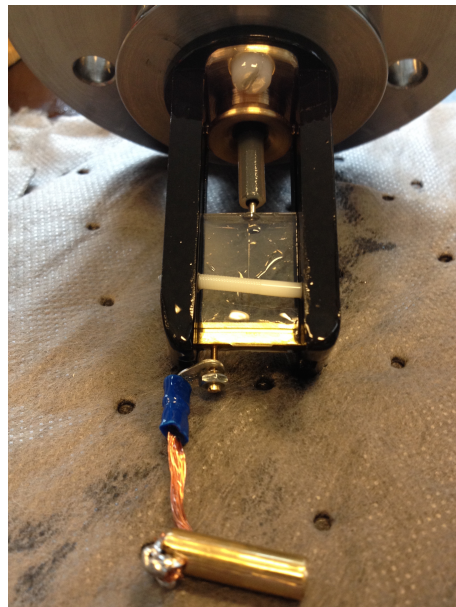
Figur 3.9: Trykktank med glassvindu og flenser for å holde vinduene på plass. Legg merke til dobbelt O-ringspor på flensen.

Siden det på dette tidspunktet ikke var klart hvordan det skulle lages en trykktett kabelgjennomføring gjennom det metalliske lokket på tanken, ble det valgt å lage et identisk lokk av det ikke ledende materialet POM (PolyOxyMethylene/Polyacetal). Dette lokket ble brukt til å gjennomføre trevekstforsøkene ved atmosfærisk trykk. Det ble laget et stativ i POM for å holde fast testobjektet som vist i figur 3.10a. Dette stativet ble laget slik at det kunne skrues fast på både POM-lokket og det syrefaste lokket som senere skulle bli trykktett. Det ble laget

blindplugg med gjengeteip som ble plassert i gjengehullene for pumpe og sikkerhetsventil i trykktanken da det skulle gjennomføres eksperimenter uten trykk. Som elektrisk leder fram til nålen ble det brukt en miniatyrkabel med avskrelt ytre halvleder. Beregninger utført av SINTEF Energi viste at boltene i flensen skulle skrues til med et moment på 6,7 Nm, mens boltene i lokket og bunnen skulle skrues til med 44 Nm.



(a) POM lokk med feste for testobjekt. Lederen holdes fast i lokket ved hjelp av en polymerisk kile.



(b) Trykktett lokk med feltstyring.

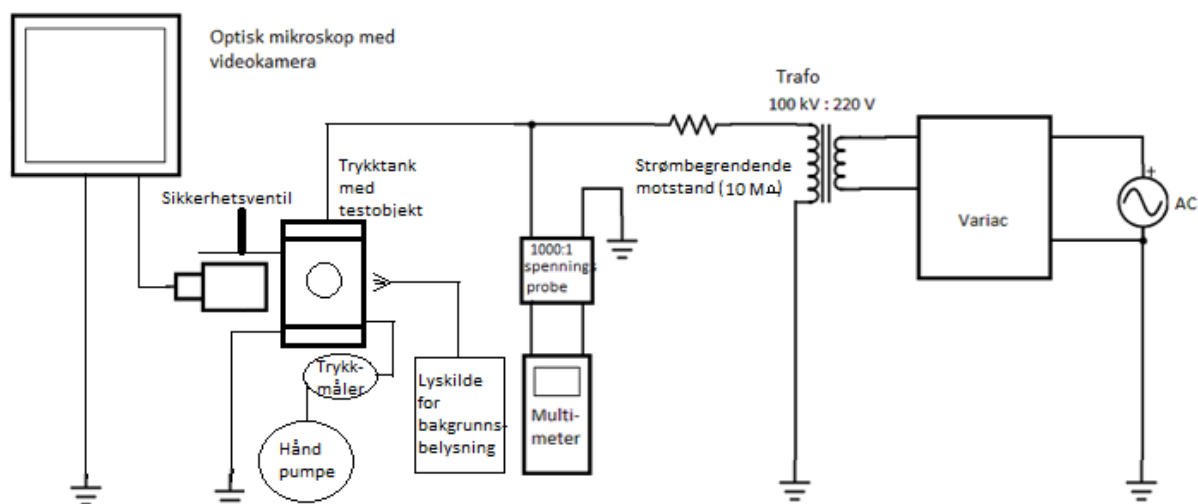
Figur 3.10: Lokk og stativ for testobjekt. Nålen ble koblet sammen med høyspenningslederen ved hjelp av en mutter med indre diameter på 1,7 mm. Til messingbiten ble det festet en lisse med et lodd som lå på bunnen av den jordede tanken.

For å gjennomføre eksperimenter med elektrisk trevekst under trykk ble neste utfordring å gjøre kabelgjennomføring i lokket som ble laget av rustfritt stål trykktett. Et stålrør ble først klemt rundt en miniatyrkabel. Det ble boret et hull i lokket som stålrøret med miniatyrkabelen ble ført gjennom. Det ble brukt en patent utviklet av SINTEF Energi med klemring rundt stålrøret for å gjøre kabelgjennomføringen trykktett. En feltstyring laget av messing ble brukt rett innenfor lokket. Isolasjonen ble deretter



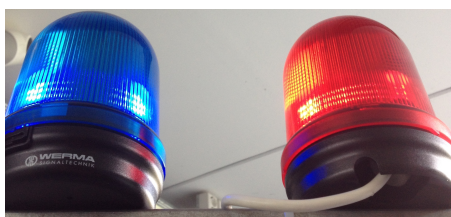
Figur 3.11: Kabelgjennomføring i trykktett lokk.

skrellet av utenfor feltstyringen slik at kabelisolasjonen kom i kontakt med oljen inne i tanken. Omtrent 20 cm av halvlederen ble skrellet av slik at isolasjonen kom til syne i andre enden av kabelen. En feltstyrende duk ble festet rundt overgangen mellom isolasjonen og halvlederen ved hjelp av vulkteip. En strømbegrensende motstand på  $10\text{ M}\Omega$  ble koblet mellom høyspenningssiden av transformatoren og miniatyrkabelen for å beskytte elektrisk utstyr ved gjennomslag. Det ble bestilt sikkerhetsventil, manometer og overganger for å koble håndpumpen til tanken. En skisse av testoppsettet for eksperiment med trykk er vist i figur 3.12.



Figur 3.12: Oppsett for eksperiment med elektrisk trevekst.

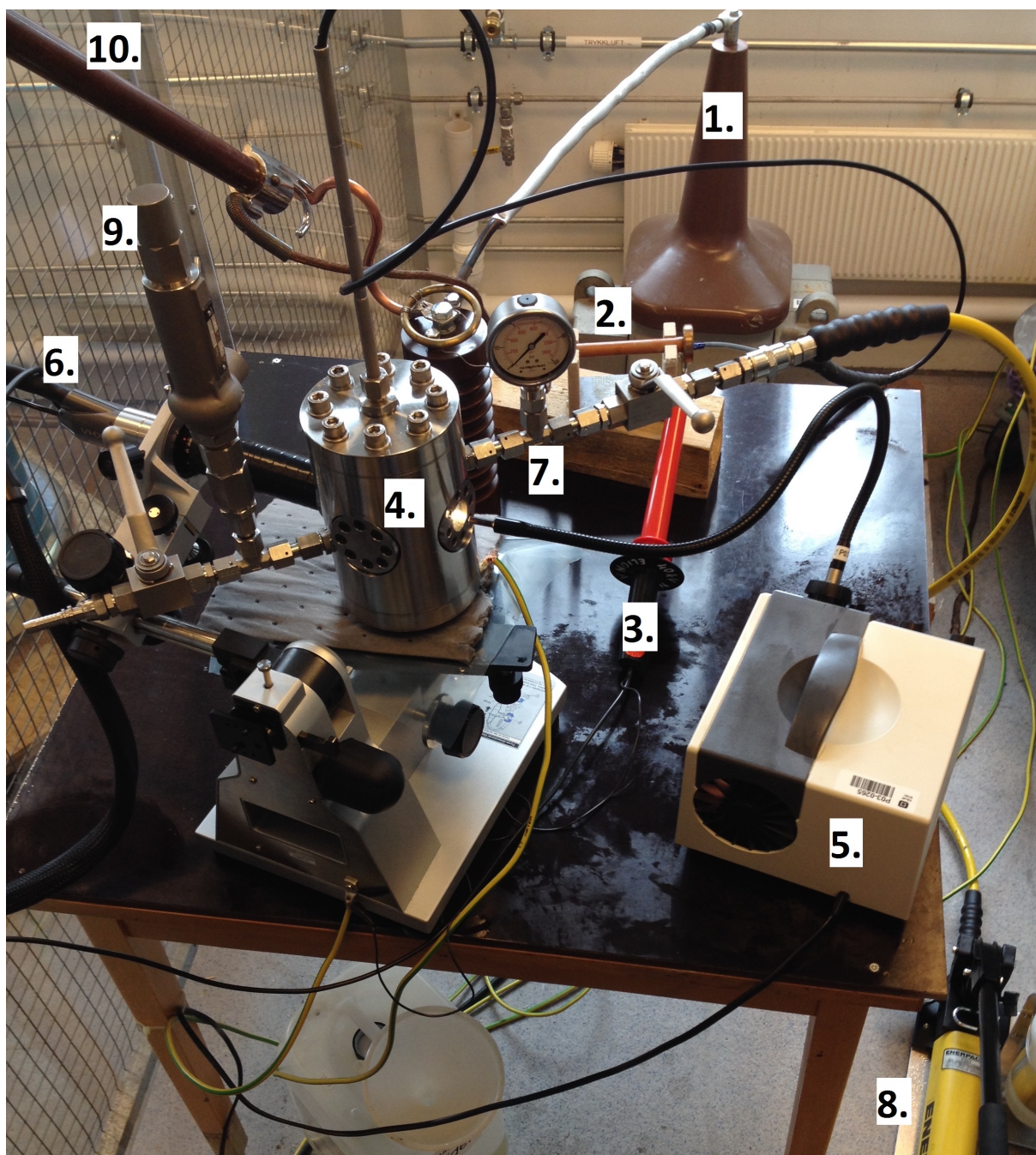
Det ble ganske stor avstand fra vinduet og inn til testobjektet inne i tanken, og det satte begrensinger for hvilket objektiv som kunne brukes til å ta bilder av treveksten. Det ble valgt et objektiv med mulighet for 40 ganger forstørrelse. Dette ble koblet til et Keyence VHX-600 mikroskop. Det ble plassert et rør mellom objektivet og tanken for at lyset i rommet ikke skulle forstyrre bildet. Det ble også brukt en ekstern lyskilde som bakgrunnsbelysning fordi skyggeeffekten gjorde at det ble bedre bilder av det elektriske treet. Testoppsettet ble plassert i en celle omgitt av plexiglass og gitter, og det ble brukt vernebriller da tanken var trykksatt. Utenfor cellen ble det plassert varsellys som vist i figur 3.13.



Figur 3.13: Blått lys viste trykksatt område, mens rødt lys viste spenningsatt område.



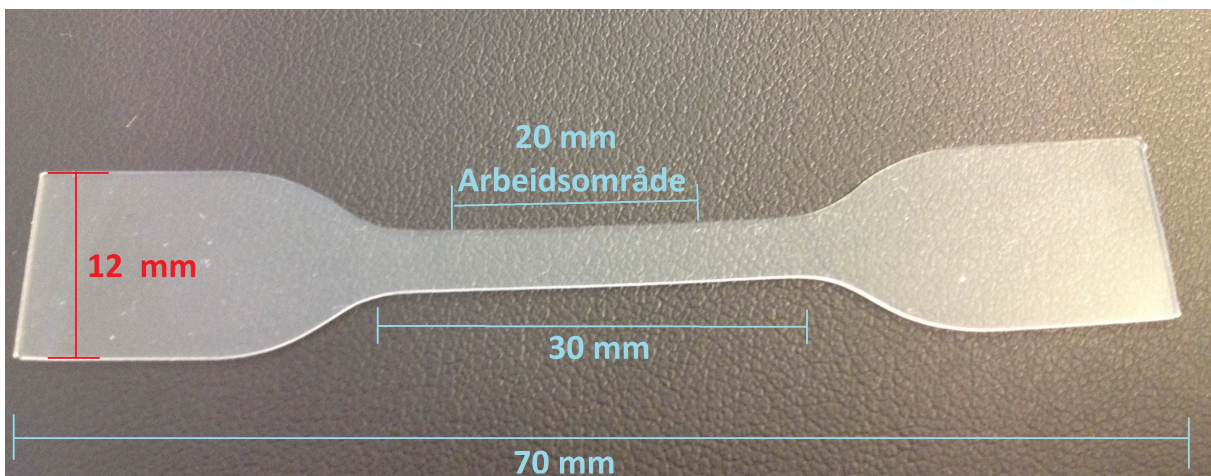
Variacen skulle kobles ut automatisk da kortslutningsstrømmen oversteg en gitt verdi, slik at strømmen ble brutt hvis det ble gjennomslag i testobjektet.



Figur 3.14: Bilde av oppsettet for eksperiment med elektrisk trevekst. På bildet er 1: Transformator. 2: Strømbegrensende motstand på 10 M $\Omega$ . 3: Spenningsprobe. 4: Trykktank. 5: Lyskilde. 6: Videokamera med objektiv tilkoblet mikroskop. 7: Manometer. 8: Håndpumpe. 9: Sikkerhetsventil (160 Bar). 10: Jordingsstav. Mikroskop, variac og multimeter ble plassert utenfor cellen for overvåking og styring.

### 3.2.3 Mekaniske egenskaper

Som nevnt tidligere i teorien om gjennomslag vil holdfastheten avhenge av gasstrykket inne i luftlommene, som igjen er avhengig av de mekaniske egenskapene til silikonet. Hydrostatiske trykkrefter kan føre til at silikonet presses sammen, og for å kartlegge om silikonet ble mykere da det inneholdt olje ble det gjennomført strekktester. Det ble gjennomført strekktester på silikon som hadde blitt mettet med olje på måten beskrevet i avsnitt 3.2.1, og silikon som ikke hadde vært i kontakt med olje. For å få til dette ble det laget hundebein som vist i figur 3.15. Hundebenet ble laget på samme måte som testobjektet for diffusjon av olje, med noen små forandringer. Silikonet ble herdet og etterherdet på samme måte, men silikonet ble presset i en 0,5 mm tykk form istedet for 6 mm. Deretter ble hundebenet stanset ut i en presse. Hundebenet ble festet i en strekkbenk og ble strekt til det revnet i arbeidsområdet vist i figur 3.15. Strekkraften og prosentvis forlengelse ble målt ved hjelp av en maskin tilkoblet strekkbenken.



Figur 3.15: Bilde av hundebein med arbeidsområde. Arbeidsområdet hadde en bredde på 4 mm.

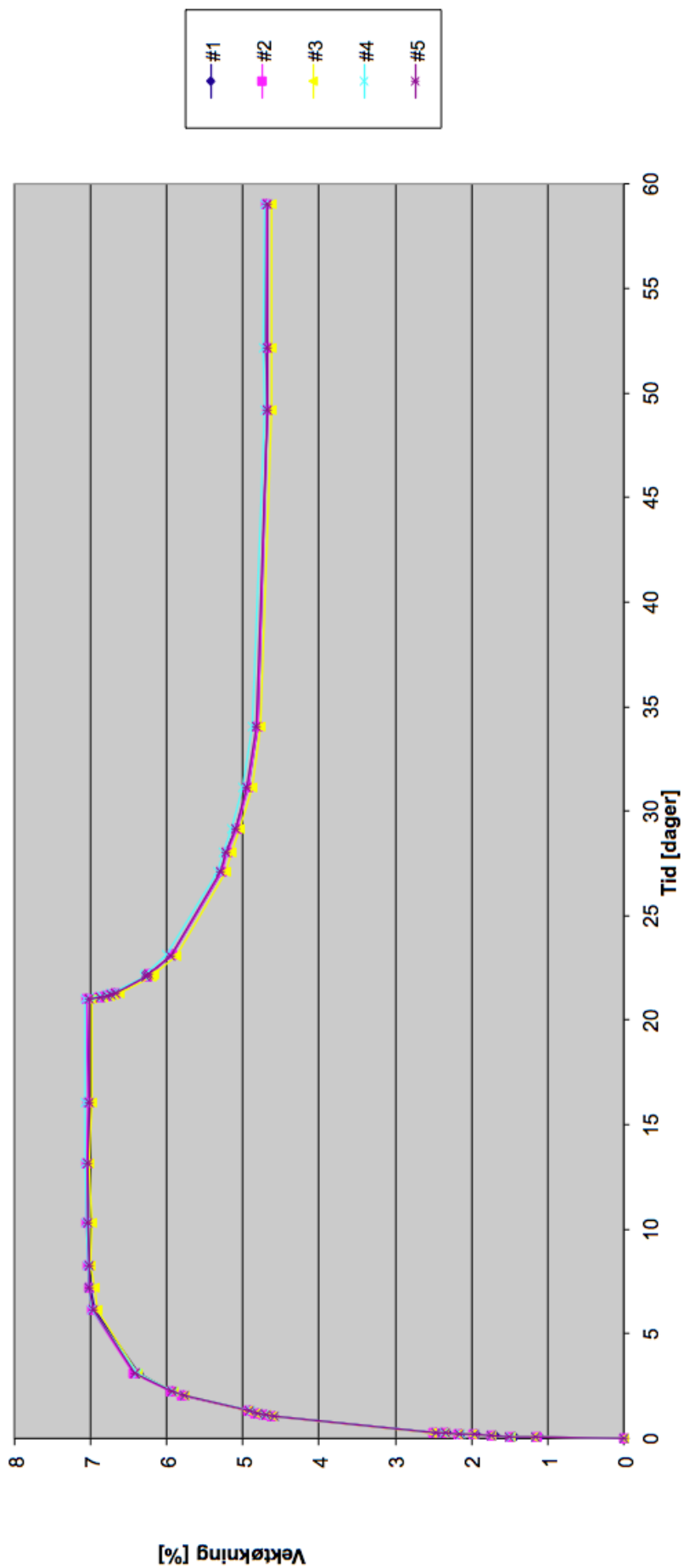
## Resultater

Dette kapitlet presenterer resultatene fra forsøkene som har blitt gjennomført for å teste hypotesene gitt i avsnitt 1.3. Resultatene er presentert i form av tabeller, grafer og bilder, og en diskusjon av resultatene og mulige feilkilder er presentert i kapittel 5. Grafer og tabeller som ble for omfattende å ta med i dette kapitlet er flyttet til vedleggene som er plassert helt til slutt i denne masteroppgaven.

### 4.1 Diffusjon

Diffusjonseksperimentene ble gjennomført for å finne ut mer om hvordan oljen diffunderer inn i de fem testobjektene som ble laget. Resultatene ble brukt til å mette testobjektene for elektrisk trevekst på en effektiv måte. Målemetoden beskrevet i kapittel 3.2.1 ble benyttet for å måle diffusjonsopptaket. Teorien i kapittel 2.1 sier at det går raskere å mette testobjekter med olje ved høyere temperaturer, så diffusjonseksperimentet ble derfor gjennomført ved 60°C. Denne høye temperaturen ble valgt for å være sikker på at testobjektet hurtig ble mettet med olje. Da testobjektene ble mettet med olje ble de lagt i olje med romtemperatur (20°C) for å finne ut om oljen diffunderer ut av testobjektet ved denne temperaturen.

En grafisk fremstilling av relativt masseopptak i prøvene er gjengitt i figur 4.1. Verdiene som ble brukt for å lage grafen finnes i vedlegg A.2.



Figur 4.1: Vektøkning for silikontestobjekter.

Fra figur 4.1 er det tydelig at det ikke er stor variasjon i oljeopptaket når de 5 prøvene sammenlignes. Dette gjelder både ved 60°C og 20°C. I appendiks A.1 finnes grafene som ble brukt for å finne diffusjonskoeffisientene ved hjelp av kurvetilnærming. Estimerte diffusjonskonstanter ved 60°C for de ulike testobjektene er gjengitt i tabell 4.1.

Testobjekt	Diffusjonskonstant [ $\frac{m^2}{s}$ ]
# 1	$3.01 * 10^{-11}$
# 2	$3.11 * 10^{-11}$
# 3	$3.12 * 10^{-11}$
# 4	$2.95 * 10^{-11}$
# 5	$3.11 * 10^{-11}$
Gjennomsnitt	$3.06 * 10^{-11}$

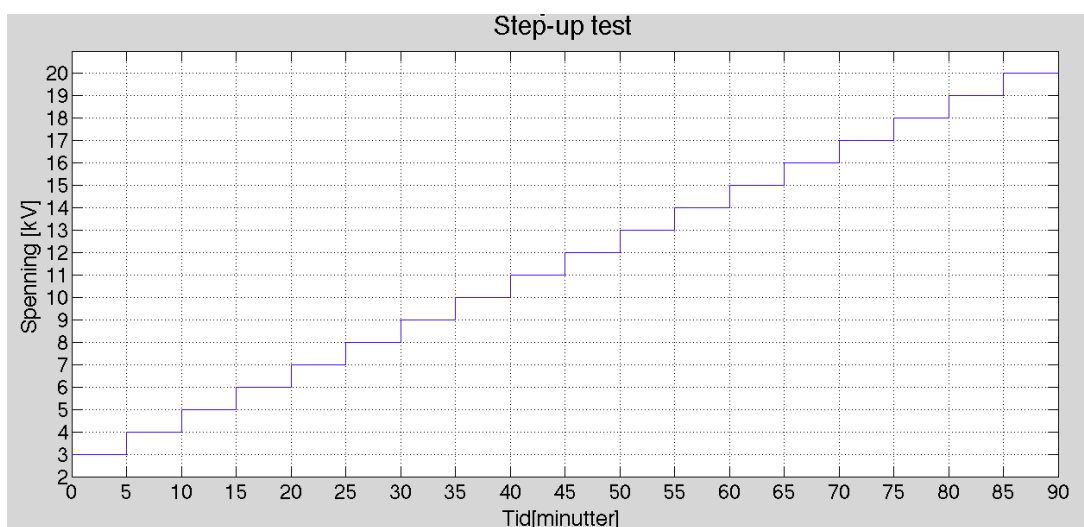
Tabell 4.1: Diffusjonskonstanter for silikontestobjekter ved 60°C.

Som figur 4.1 viser foregikk oljeopptaket relativt likt i alle testobjektene, og diffusjonskonstantene for absorpsjon ved 60°C er i samme størrelsesorden. Testobjektene for diffusjon og elektrisk trevekst hadde samme størrelse, og det ble antatt at de brukte like lang tid på å bli mettet med olje siden oljen i hovedsak diffundererte inn gjennom den flate delen av testobjektet. Da gjennomsnittet av diffusjonskonstantene ble satt inn i ligning 2.3, ga det en tid på 9.13 dager før testobjektene med silikon ble minst 99% mettet ved 60°C. Testobjekt nr 4 hadde den laveste diffusjonskonstanten, og tilsvarende utregning med denne verdien ga 9.47 dager. Gjennomsnittlig vektøkning ved denne temperaturen var 7.03%.

Fra figur 4.1 kan det leses av at testobjektene må ligge ytterligere i omtrent 30 dager før de med sikkerhet når metningsnivået ved 20°C. Gjennomsnittlig vektøkning fra tørrvekt ved denne temperaturen var 4.68%. Vektreduksjonen av testobjektene forandret seg svært lite etter at de hadde ligget i olje ved 20°C i 13 dager. Det tok lang tid å få klart testoppsettet for elektrisk trevekst, og alle våte testobjekter for elektrisk trevekst lå i olje i over 30 dager ved 20°C etter å ha blitt mettet ved 60°C i 10 dager.

## 4.2 Elektrisk Trevekst

Da det skulle gjennomføres forsøk med elektrisk trevekst i silikon ble det valgt å gjøre to typer eksperimenter. Det første eksperimentet, Slow Rate-of-Rise Test [24] ble brukt for å kartlegge gjennomslagsspenningen og spenningen ved begynnende trevekst. Dette måtte gjøres først for å finne ut ved hvilke spenninger det andre eksperimentet med langtidstesting skulle gjennomføres. Initial spenning over testobjektet ble valgt til 3 kV, for så å bli økt med 1 kV hvert femte minutt. Spenningen ble justert opp helt til gjennomslag i testobjektet inntraff (gjennomslagsspenning).



Figur 4.2: Spenningsnivå for Slow Rate-of-Rise Test.

Holdfastheten til et materiale måles i  $[\frac{kV}{mm}]$ . I denne testen kunne holdfastheten til materialet finnes ved å trekke 1 kV fra gjennomslagsspenningen, og dele på avstanden mellom elektrodene som var 2 mm for alle testobjekter. Det ble valgt et væsketrykk på 50 bar for eksperimentene med trykk. Dette trykket ble valgt ganske tilfeldig, men resultatene fra testene viste at dette trykket påvirket treveksten. Tabell 4.2 viser antall tester som ble gjennomført.

	Uten olje		Med olje	
	Step-up	Langtidstesting	Step-up	Langtidstesting
1 bar	3	4	3	4
50 bar	3	4	3	4

Tabell 4.2: Antall tester som ble gjennomført.

### 4.2.1 Gjennomslagsspenning og spenning ved begynnende trevekst

Resultatene fra step-up eksperimentet er oppsummert i tabellene under. Spenningsnivåene for langtidstesting ble valgt med utgangspunkt i disse tabellene.

Test	Begynnende trevekst [kV]	Tid [min:sek]	Gjennomslagsspenning [kV]	Tid [min:sek]
# 1	5,0	10:02	10,0	36:08
# 2	4,0	05:10	10,0	35:40
# 3	4,0	05:30	10,0	37:08
Gjennomsnitt	4,3	06:54	10,0	36:19

Tabell 4.3: Resultat av Slow Rate-of-Rise Test med tørre testobjekter på 1 bar.

Test	Begynnende trevekst [kV]	Tid [min:sek]	Gjennomslagsspenning [kV]	Tid [min:sek]
# 4	5,0	11:46	14,0	58:02
# 5	6,0	16:40	15,0	60:27
# 6	5,0	11:23	14,0	55:26
Gjennomsnitt	5,3	14:13	14,3	58:58

Tabell 4.4: Resultat av Slow Rate-of-Rise Test med våte testobjekter på 1 bar.

Test	Begynnende trevekst [kV]	Tid [min:sek]	Gjennomslagsspenning [kV]	Tid [min:sek]
# 7	8,0	27:10	12,0	46:54
# 8	8,0	26:28	13,0	53:29
# 9	8,0	26:45	12,0	48:25
Gjennomsnitt	8,0	26:48	12,3	49:36

Tabell 4.5: Resultat av Slow Rate-of-Rise Test med tørre testobjekter på 50 bar.

Test	Begynnende trevekst [kV]	Tid [min:sek]	Gjennomslagsspenning [kV]	Tid [min:sek]
# 10	7,0	20:35	20,0	88:14
# 11	8,0	25:35	19,0	80:39
# 12	7,0	20:22	19,0	81:41
Gjennomsnitt	7,3	22:11	19,3	83:34

Tabell 4.6: Resultat av Slow Rate-of-Rise Test med våte testobjekter på 50 bar.

Ved å sammenligne tabell 4.3 og 4.4 for trevekst uten trykk er det tydelig at de oljemettede testobjektene hadde høyest holdfasthet. Det tok også lengre tid før treveksten begynte i disse testobjektene. For trevekst med trykk var det også høyere gjennomslagsspenning i de våte testobjektene enn det var i de tørre. Det tok imidlertid gjennomsnittlig kortere tid før treveksten begynte i de våte testobjektene da eksperimentet ble kjørt med trykk.

For de oljemettede testobjektene ble det observert hulrom rundt nålspissen i alle testobjektene. Nålen satt godt fast i isolasjonen. Testobjektene ble undersøkt under mikroskop før nedsenking i olje, og da ble det ikke observert hulrom ved nålspissen. Siden testobjektet var 100% mettet ble det antatt at



Figur 4.3: Bilde av nålspiss for et oljemettet testobjekt.

også hulrommet ved spissen var fylt med olje. For de umettede testobjektene ble det ikke observert tilsvarende rom mellom nålspissen og silikonet. Tiden til treveksten begynte kan i stor grad avhenge av denne forskjellen, siden treveksten ble initiert ved nålspissen.

For de tørre prøvene ved atmosfærisk trykk ble det observert at det elektriske treet vokste litt i lengden og bredden da spenningen ble justert opp før veksten stagnerte. Dette ble observert for alle spenningsnivå etter treveksten begynte fram til gjennomslag inntraff. Tidligere eksperimenter gjennomført av B. X. Du, Z. L. Ma og Y. Gao [5] viste at det elektriske treet vokste raskt i starten før det nådde stagnasjonsfasen og deretter vokste med ca. 2% per 30 minutt ved 9 kV da avstanden i nål-plategapet var 2 mm.

Step-up testen for våte testobjekter ved atmosfærisk trykk viste at treet vokste ca. 20% av avstanden fra nålspissen til jord etter det elektriske treet begynte å vokse. Deretter vokste ikke treet i lengden, men det ble mer bushing da spenningen ble justert opp. Da gjennomslagsspenningen ble nådd vokste det elektriske treet raskt gjennom isolasjonen, og det ble gjennomslag da treet nådde jordelektroden.

For de tørre testobjektene ved 50 bar vokste det elektriske treet raskt i lengden og bredden da spenningen ble justert opp på samme måte som ved 1 bar. Treveksten stoppet imidlertid ikke helt opp, men fortsatte å vokse litt i både lengde og bredde.

I de våte testobjektene som ble testet på 50 bar vokste det elektriske treet langsomt med mye bushing i starten, før treet raskt vokste gjennom isolasjonen ved gjennomslagsspenningen.

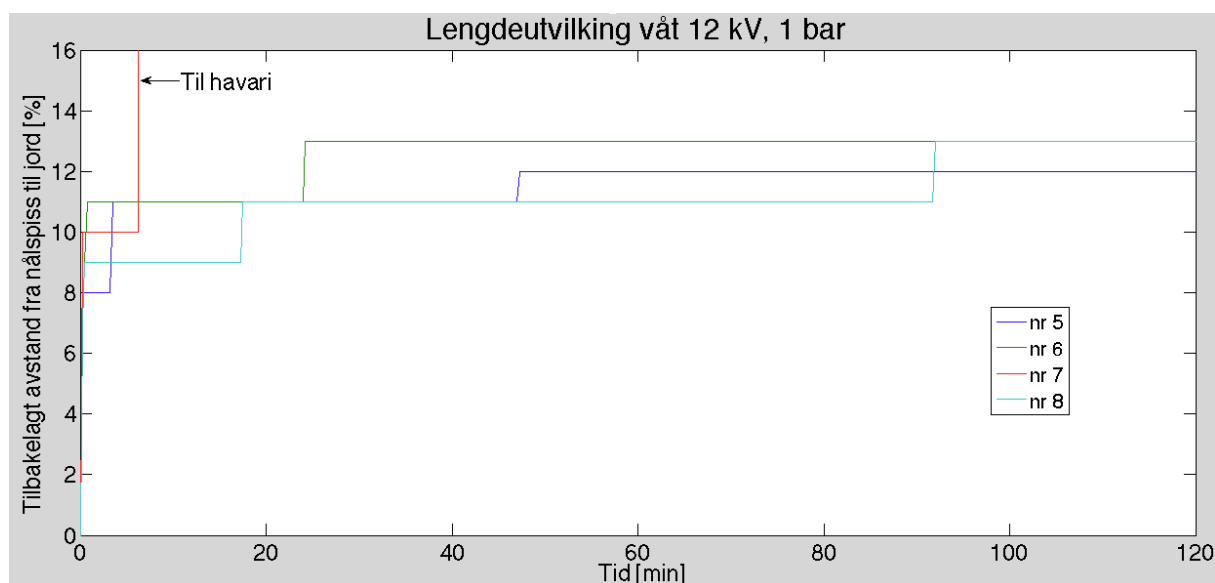


### 4.2.2 Langtidstesting

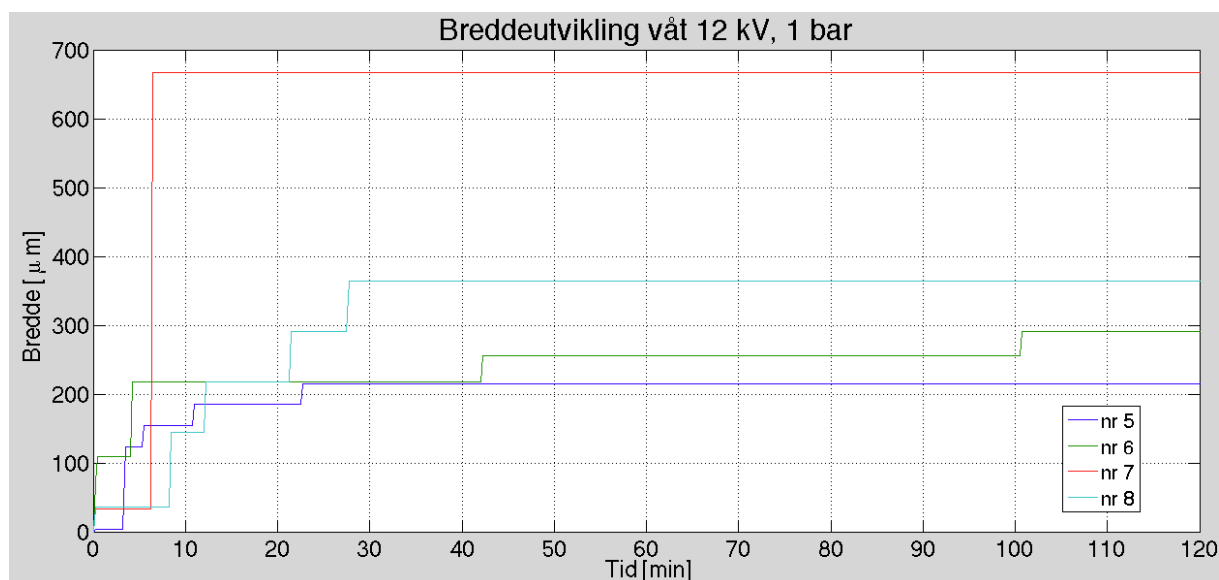
Neste steg ble å se hvordan treveksten utviklet seg i testobjektene ved konstante spenninger. Spenningsnivået ble satt mellom spenningen ved begynnende trevekst og gjennomslagsspenningen. Siden det tok lang tid å gjøre klart testoppsettet og lage testobjektene, ble det litt knapt med tid til å gjennomføre disse testene. Det ble derfor besluttet å gjennomføre langtidstesting ved spenninger litt lavere enn gjennomslagsspenningen for at eksperimentet ikke skulle ta for lang tid. Det ble spesielt fokusert på vekstutviklingen de første minuttene og de to første timene. Hvis gjennomslag ikke hadde inntruffet innen to timer ble eksperimentet i de fleste tilfeller avsluttet, men noen tester ble kjørt lengre. I alle tilfeller var det liten eller ingen forandring i det elektriske treet etter 90 minutter. I de tilfellene det elektriske treet vokste helt gjennom isolasjonen ble det gjennomslag umiddelbart etter det elektriske treet nådde jordelektroden. Dette underkapittelet inneholder grafer som viser lengde og breddeutvikling av det elektriske treet, bilder av treveksten og kommentarer til resultatene. I grafene som viser lengdeutvikling har gjennomslag inntruffet når verdien på y-aksen overstiger 100%. Verdiene som ble brukt til å lage grafene finnes i vedlegg [B](#).

### Oljemettet testobjekt ved 1 bar

Gjennomsnittlig gjennomslagsspenning for våte testobjekter fra step-up testen ble målt til 14,3 kV, mens det elektriske treet ble initiert ved 5-6 kV. Det ble besluttet å gjennomføre langtidstesting ved 12 kV for 4 testobjekter. Vekstutviklingen i lengden er vist i figur 4.4, mens vekstutviklingen i bredden er vist i figur 4.5.

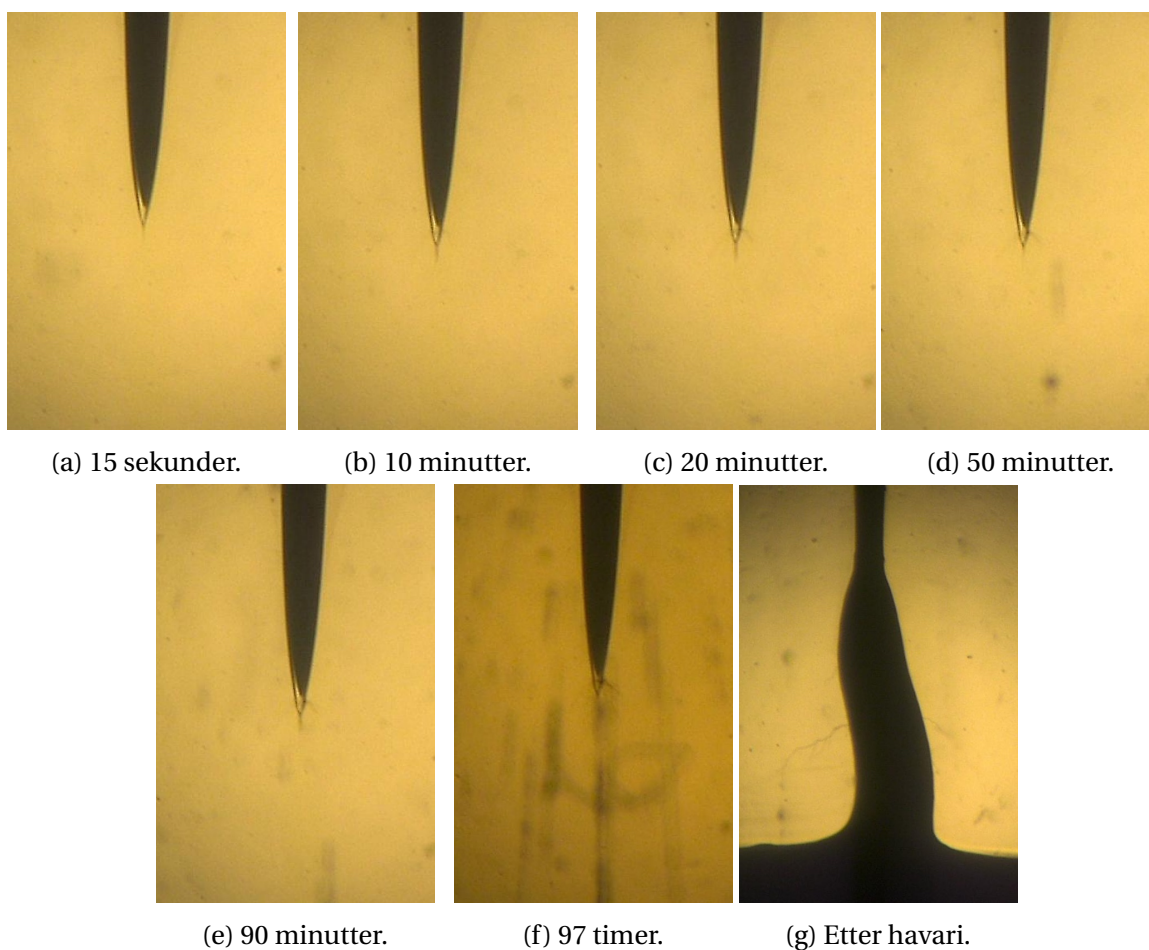


Figur 4.4: Lengdeutvikling i oljemettet testobjekt ved atmosfærisk trykk og 12 kV.



Figur 4.5: Breddeutvikling i oljemettet testobjekt ved atmosfærisk trykk og 12 kV.

I den første testen (testobjekt nr 5) sto spenningen på i 97 timer uten at det elektriske treet forandret seg hverken i lengden eller bredden etter 46 minutter. I testobjekt nr 7 inntraff gjennomslag etter 6 minutter og 28 sekunder.



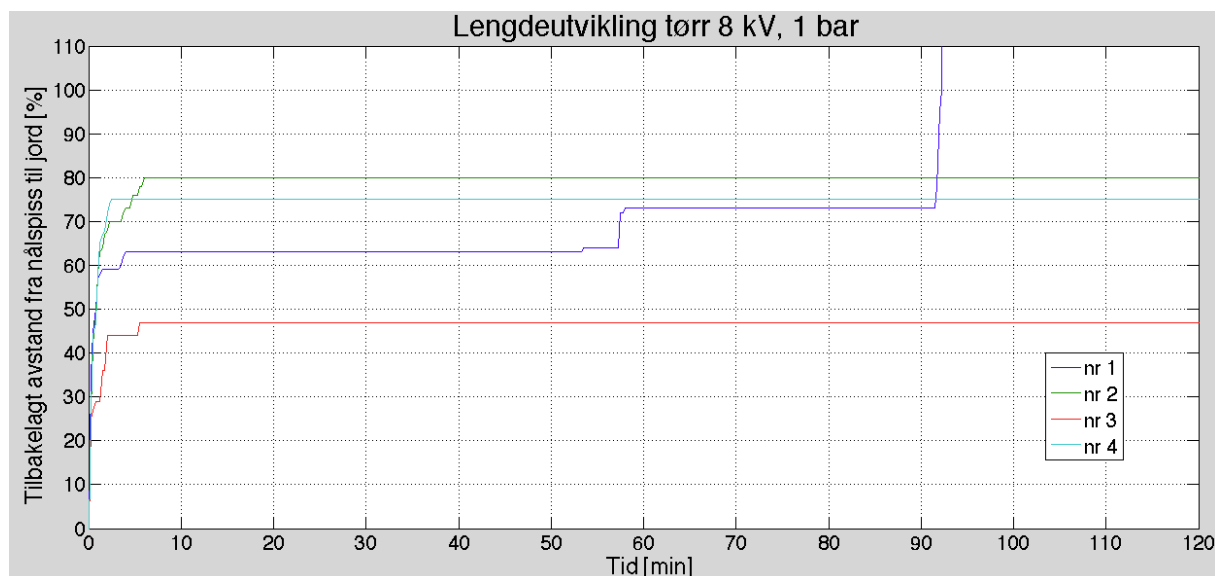
Figur 4.6: Vekstutvikling i testobjekt nr 8 fra spenningen ble påtrykket. Figur (g) viser testobjekt nr 7 etter havari.

Figur 4.6 viser at det elektriske treet ikke vokste mye i hverken bredde eller lengden. Treveksten foregikk på samme måte i testobjekt nr 5 og nr 6. I testobjekt nr 7 foregikk også treveksten på tilsvarende måte fram til gjennomslag plutselig inntraff etter 6 minutter og 28 sekunder.

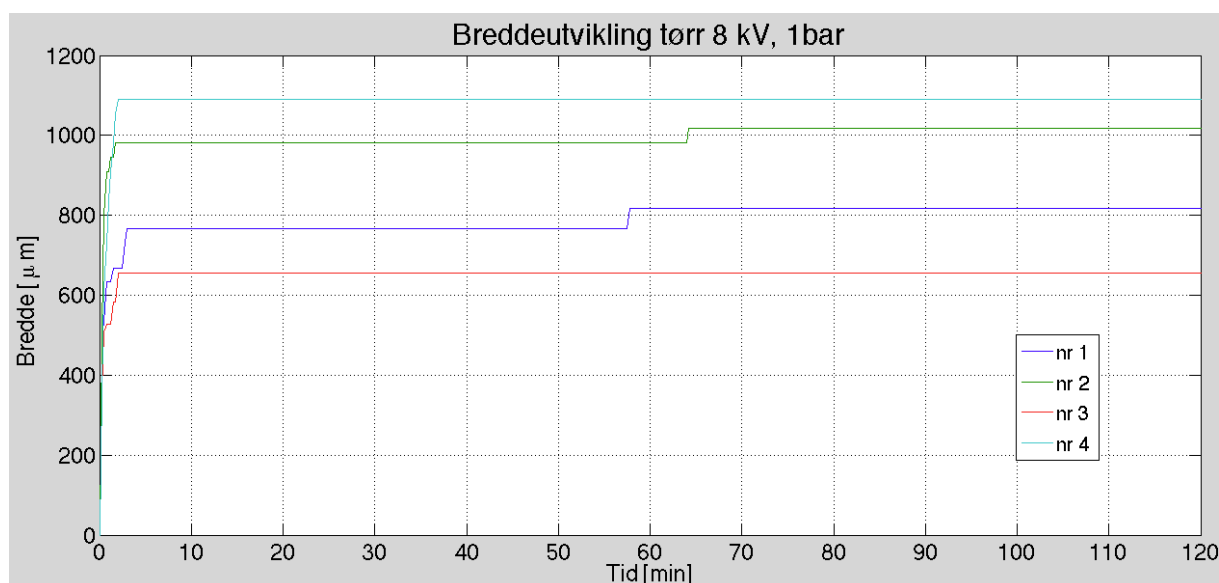
### Tørt testobjekt ved 1 bar

For testobjektet som ikke hadde vært i kontakt med olje ble det elektriske treet i gjennomsnitt initiert ved 4-5 kV, og havari inntraff ved 10 kV. Det ble besluttet å gjennomføre testingen ved 9 kV. I den første testen vokste det elektriske treet raskt gjennom silikonet før gjennomslag inntraff etter 73 sekunder. Det ble besluttet å gjennomføre 4 nye tester ved 8 kV.

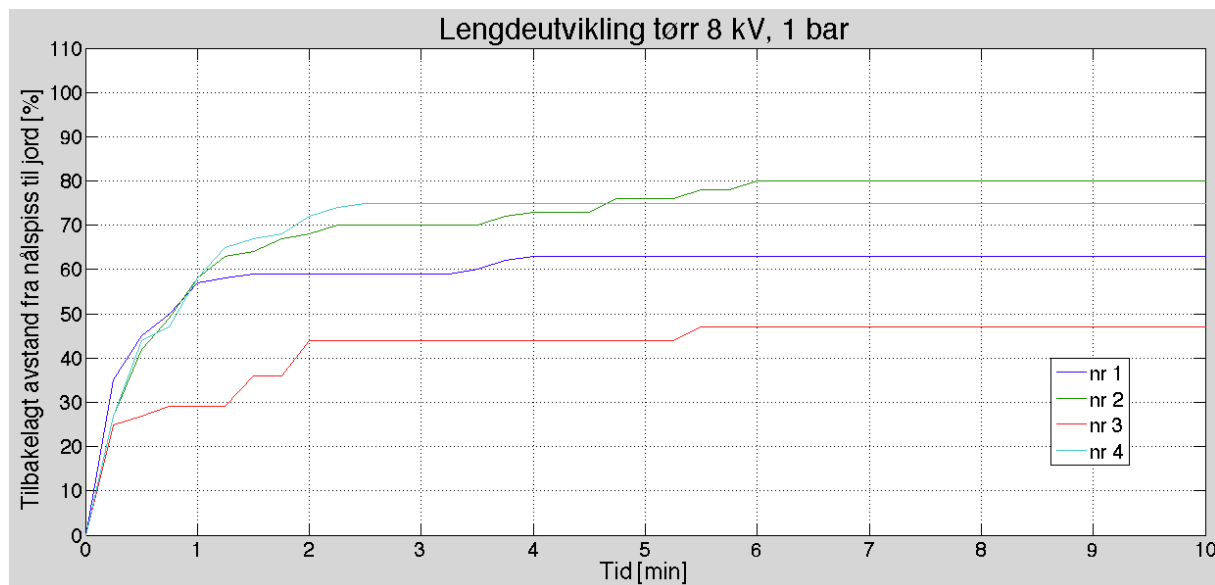
Figur 4.7 viser lengdeutviklingen av det elektriske treet i disse testobjektene.



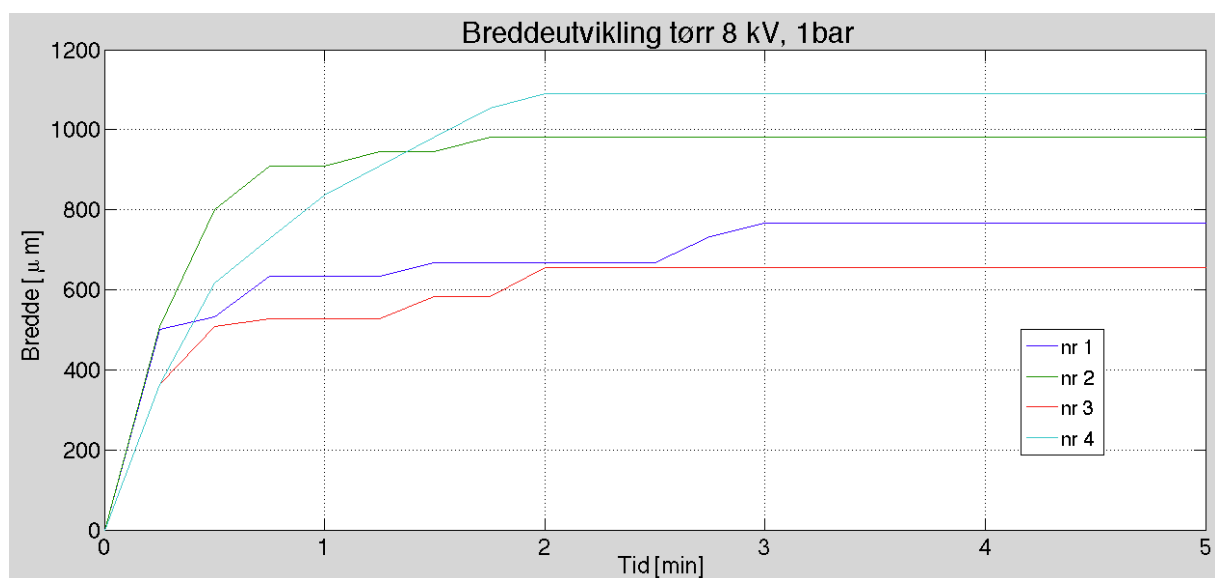
Figur 4.7: Lengdeutvikling i tørt testobjekt ved atmosfærisk trykk og 8 kV.



Figur 4.8: Breddeutvikling i tørt testobjekt ved atmosfærisk trykk og 8 kV.

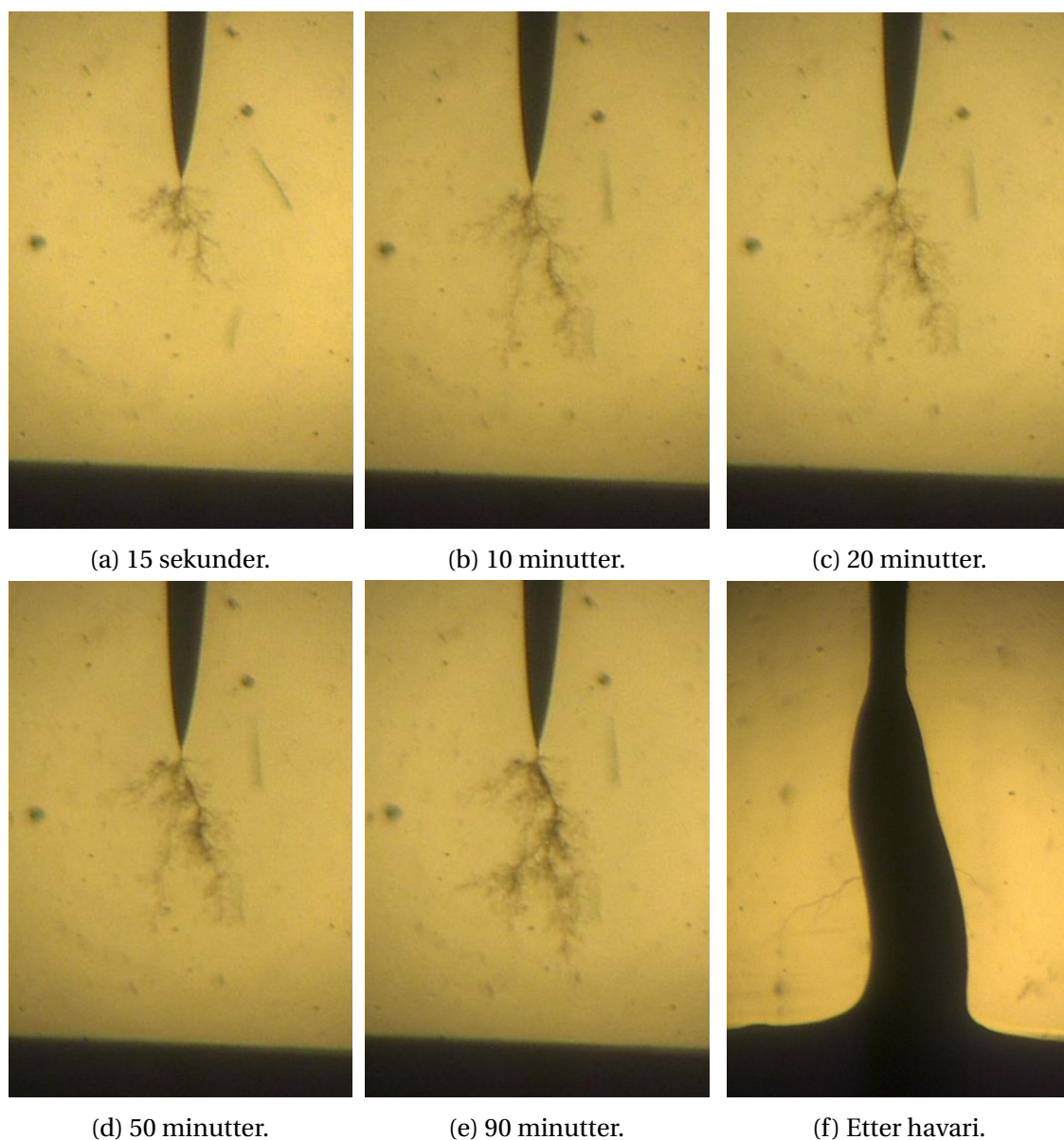


Figur 4.9: Lengdeutvikling de første 10 minuttene i tørt testobjekt ved atmosfærisk trykk og 8 kV.



Figur 4.10: Breddeutvikling de første 10 minuttene i tørt testobjekt ved atmosfærisk trykk og 8 kV.

I testobjektet nr 1 inntraff gjennomslag etter 1 time, 32 minutter og 24 sekunder. I testobjekt nr 2 ble det gjennomslag etter 6 timer, 35 minutter og 45 sekunder. De to siste testobjektene hadde spenning over seg i 4 timer hver uten at det elektriske treet forandret seg etter 70 minutter. Det elektriske treet vokste raskest i lengden og bredden med en gang spenningen ble skrudd på, før veksten stagnerte. Rett før gjennomslag vokste det elektriske treet raskt gjennom siste del av isolasjonen for både testobjekt nr 1 og nr 2.



Figur 4.11: Vekstutvikling i testobjekt nr 1 fra spenningen ble påtrykket. Figur (f) viser bilde av havari i testobjektet etter 92 minutter og 24 sekunder.

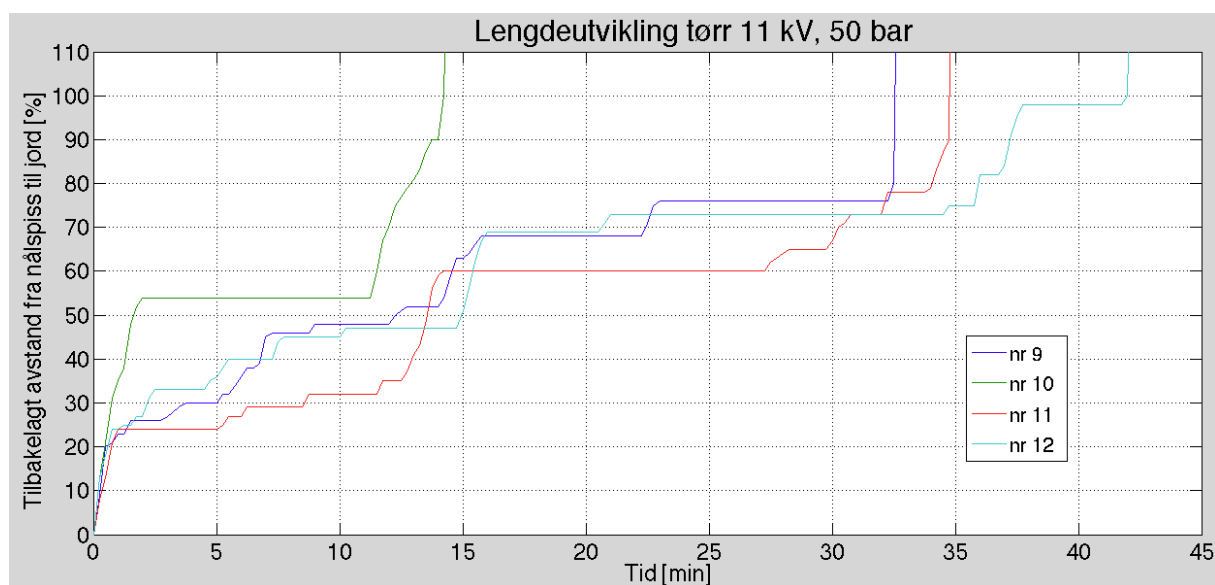
Figur 4.11 viser vekstutviklingen i testobjekt nr 1 som er det eneste testobjektet som havarerte av de fire testobjektene i denne testen før det hadde gått 2 timer. Bildene representerer også vekstutviklingen i testobjekt nr 2, 3 og 4 de første 90 minuttene. Det elektriske treet vokste raskt i starten før veksten stagnerte. I stagnasjonsfasen vokste ikke treet nevneverdig mye i lengden eller bredden, men det så ut til at trekanalene utvidet seg og at forbrenningen av isolasjonen fortsatte siden det elektriske treet ble mørkere.

### Tørt testobjekt ved 50 bar

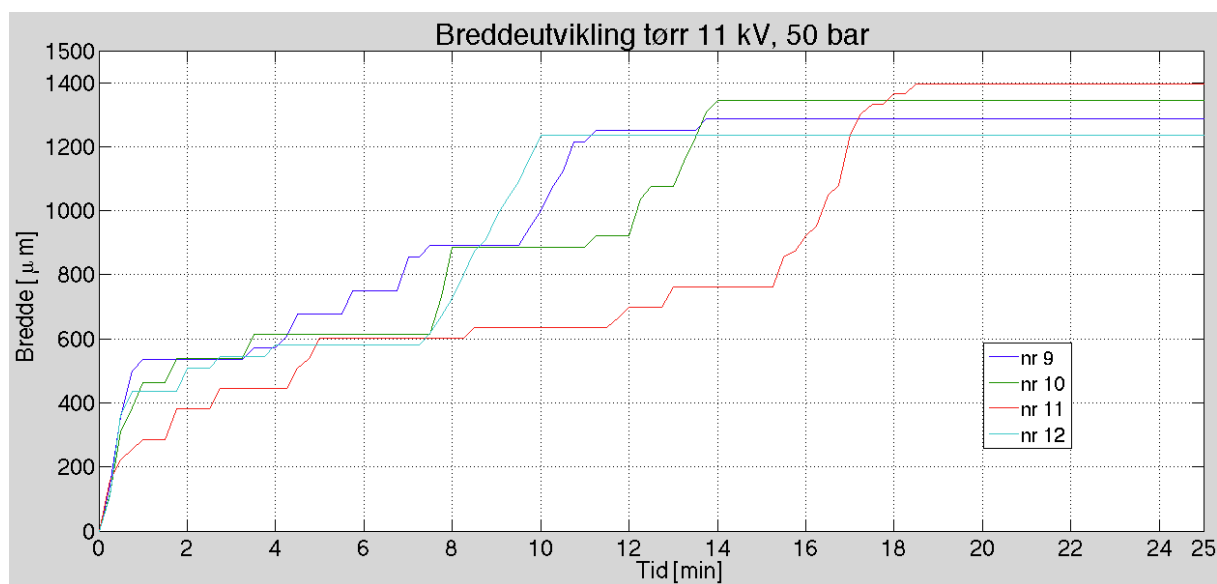
Gjennomsnittlig gjennomslagsspenning og spenning ved begynnende trevekst for de tørre testobjektene ved 50 bar var hhv. 12,3 kV og 8 kV. Det ble valgt å gjennomføre langtidstesting ved 11 kV, og det ble gjennomslag i alle testobjektene innen 45 minutter. Gjennomslagstiden for de fire testobjektene er oppsummert i tabell 4.7, mens lengde og breddeutvikling er vist i figur 4.12, og 4.13.

Testobjekt #	Tid til gjennomslag [min:sek]
9	33:07
10	14:28
11	35:14
12	41:57
Gjennomsnitt	31:11

Tabell 4.7: Langtidstesting av tørre testobjekter ved 50 bar og 11 kV.



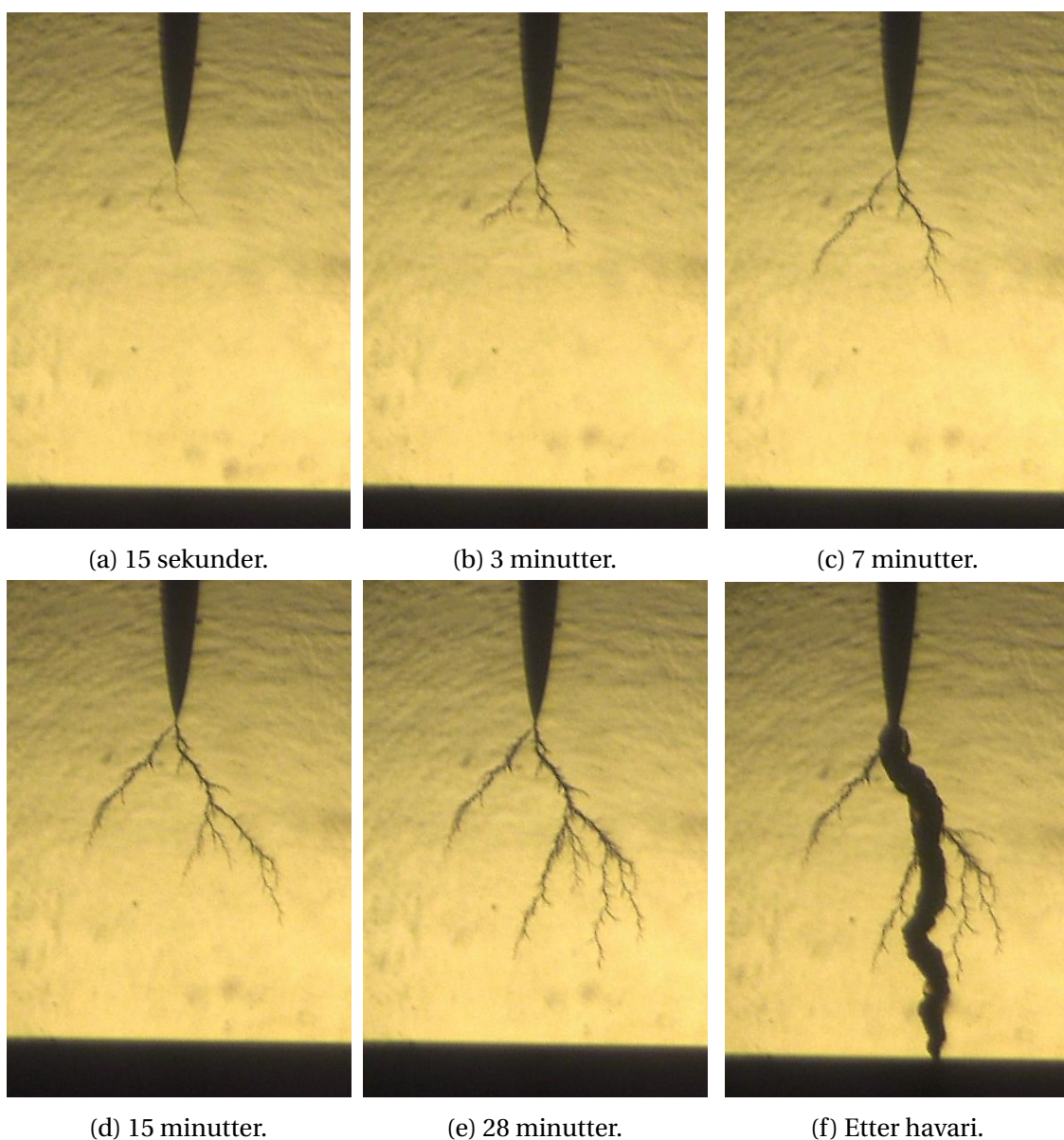
Figur 4.12: Lengdeutvikling i tørr testobjekt ved 50 bar og 11 kV.



Figur 4.13: Breddeutvikling i tørr testobjekt ved 50 bar og 11 kV.

Det elektriske treet vokste raskt i lengden da treet ble initert, og rett før det nådde jordelektroden. Veksten stagnerte ikke på samme måte som de tørre testobjektene ved atmosfærisk trykk. Det elektriske treet vokste litt også midt inne i isolasjonen, før vekstfarten økte igjen da treet hadde vokst ca. 80% av lengden i nål-plategapet. Dette var også tilfelle for breddeutviklingen.



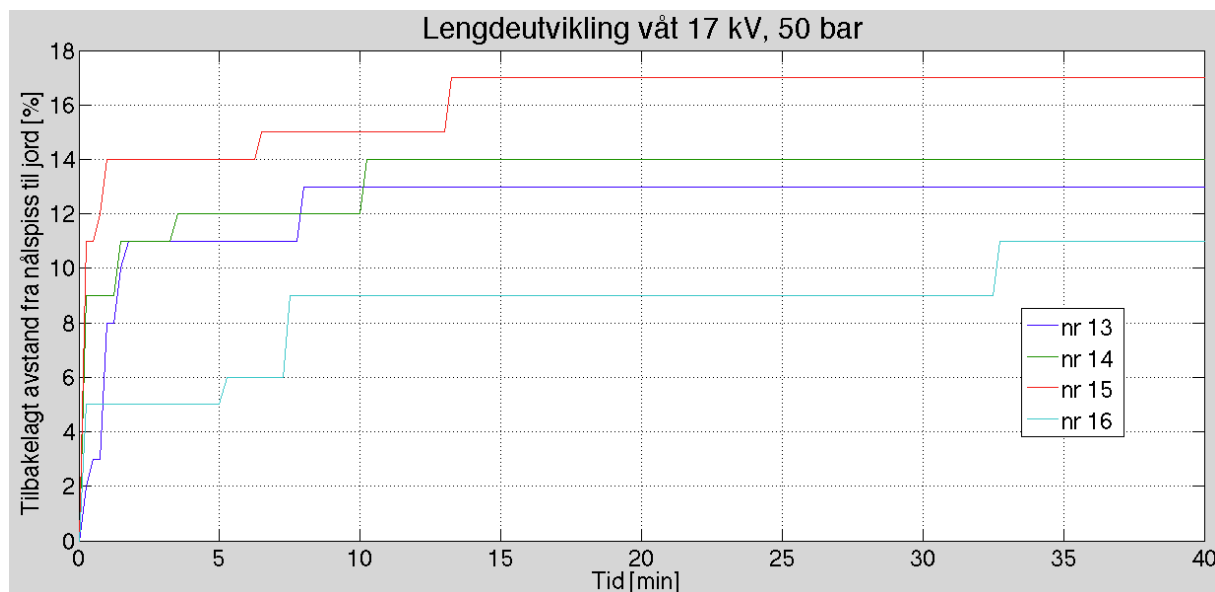


Figur 4.14: Vekstutvikling i testobjekt nr 9 fra spenningen ble påtrykket. Figur (f) viser bilde av gjennomslag i testobjektet etter 33 minutter og 7 sekunder.

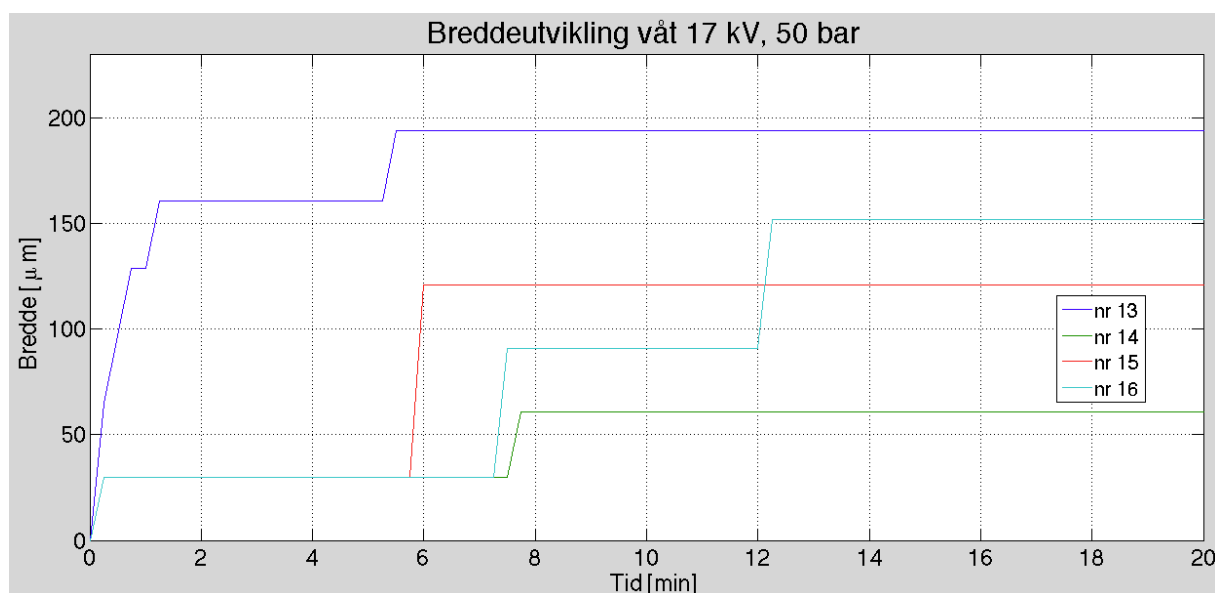
Figur 4.14 viser bilder av treveksten i testobjekt nr 9, men bildene er også representative for treveksten i testobjekt nr 10, 11 og 12. Det ble bemerket at gjennomslagskanalen var mye tynnere enn gjennomslagskanalen for testobjektene som ble testet uten trykk.

### Oljemettet testobjekt ved 50 bar

For de oljemettede testobjektene begynte det elektriske treet å vokse ved 7-8 kV, mens gjennomslagspenningen lå på 19-20 kV. Det ble besluttet å gjennomføre langtidstesting ved 18 kV. Det ble gjennomslag i det første testobjektet etter 2 minutter og 17 sekunder, og pga. den korte tiden ble det besluttet å gjennomføre eksperimentet med 4 nye testobjekter på 17 kV. Lengde og breddeutviklingen er vist i figur 4.15 og 4.16.



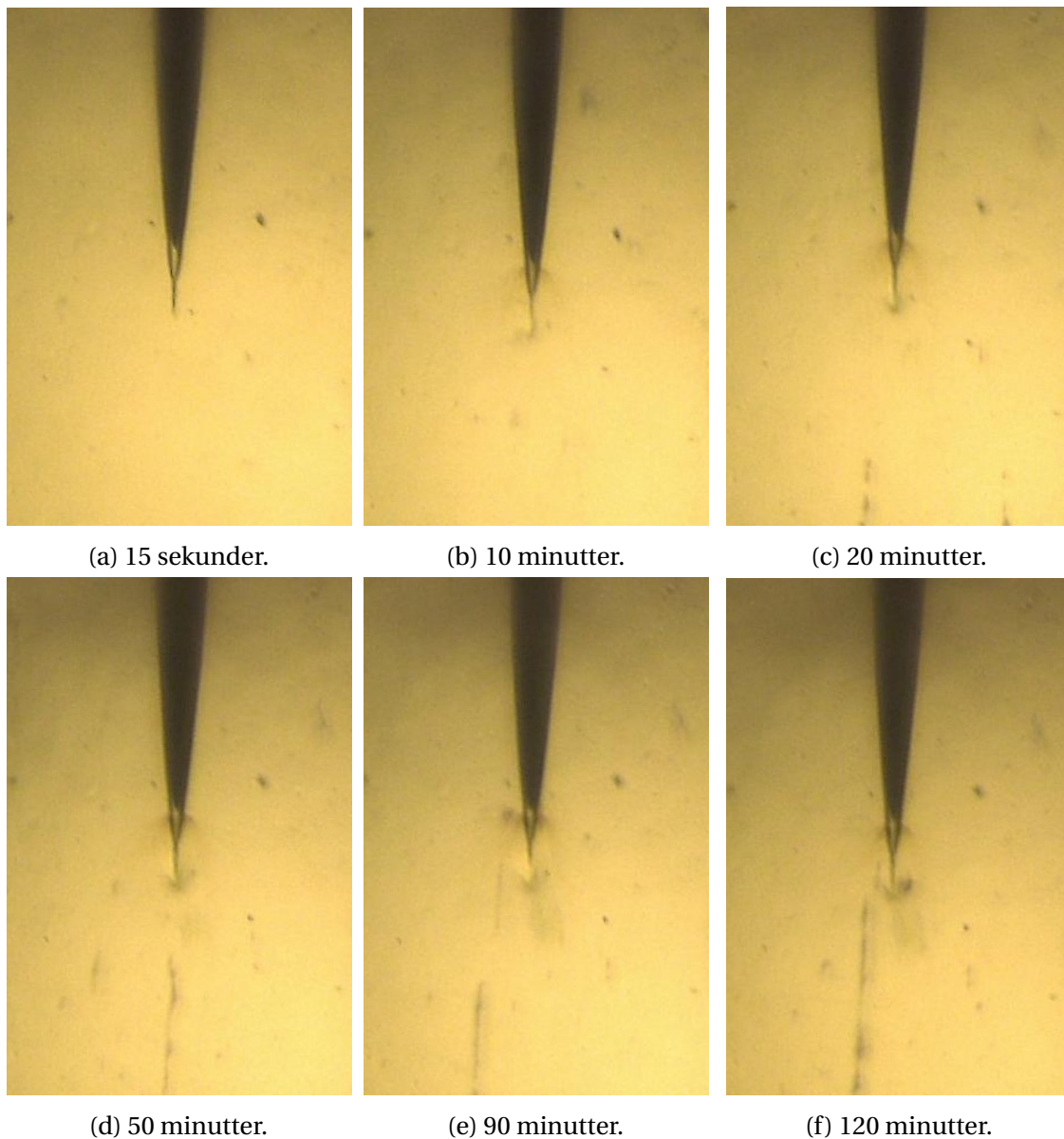
Figur 4.15: Lengdeutvikling i oljemettet testobjekt ved 50 bar og 17 kV.



Figur 4.16: Breddeutvikling i oljemettet testobjekt ved 50 bar og 17 kV.

Det elektriske treet vokste raskest i lengden i starten før veksten stagnerte på 11-17% av

lengden fra nålspissen til jordelektroden. For den første testen på 18 kV vokste det elektriske treet til 20% av lengden i løpet av 40 sekunder, for så å stagnere før gjennomslag inntraff plutselig.



Figur 4.17: Vekstutvikling i testobjekt nr 15 fra spenningen ble påtrykket.

Figur 4.17 viser bilder av trevekst i testobjekt nr 15. Treveksten i testobjekt nr 13, 14 og 16 så omtrent like ut. Det elektriske treet vokste litt ut fra spissen på nålen og stagnerte. I stagnasjonsfasen ble det mer buskvekst rundt nålspissen. Bildene viser også hulrommet ved nålspissen som ble observert i alle de oljemettede prøvene. Det så ut til at bushingen økte også inne i hulrommet etterhvert som tiden gikk.

Det sto spenning over det siste testobjektet i 60 timer, 1 minutt og 45 sekunder uten at det ble gjennomslag, og figur 4.18 viser bilde av nålspissen ved dette tidspunktet.



Figur 4.18: Testobjekt nr 16 etter 60 timer, 1 minutt og 45 sekunder.

Det så ut til at hulrommet formet seg etter det elektriske feltet da spenningen sto over testobjektet i en lengre periode. Da spenningen ble skrudd av hadde fortsatt hulrommet samme form som vist på bildet. Nålen sto i vertikal posisjon, og det virket som det forbrente silikonet forflyttet seg fritt i oljen og la seg på bunnen av hulrommet på grunn av gravitasjonskraften.

### 4.3 Mekaniske egenskaper

For å undersøke om oljen hadde innvirkning på de mekaniske egenskapene til silikonet ble det gjennomført strekktester. Fem prøveobjekter laget på måten beskrevet i kapittel 3.2.3 ble strekt til det ble brudd i arbeidsområdet med en fart på 0,833 mm/s. Strekkraften og forlengelsen ved brudd ble målt, og resultatene er oppsummert i tabell 4.8.

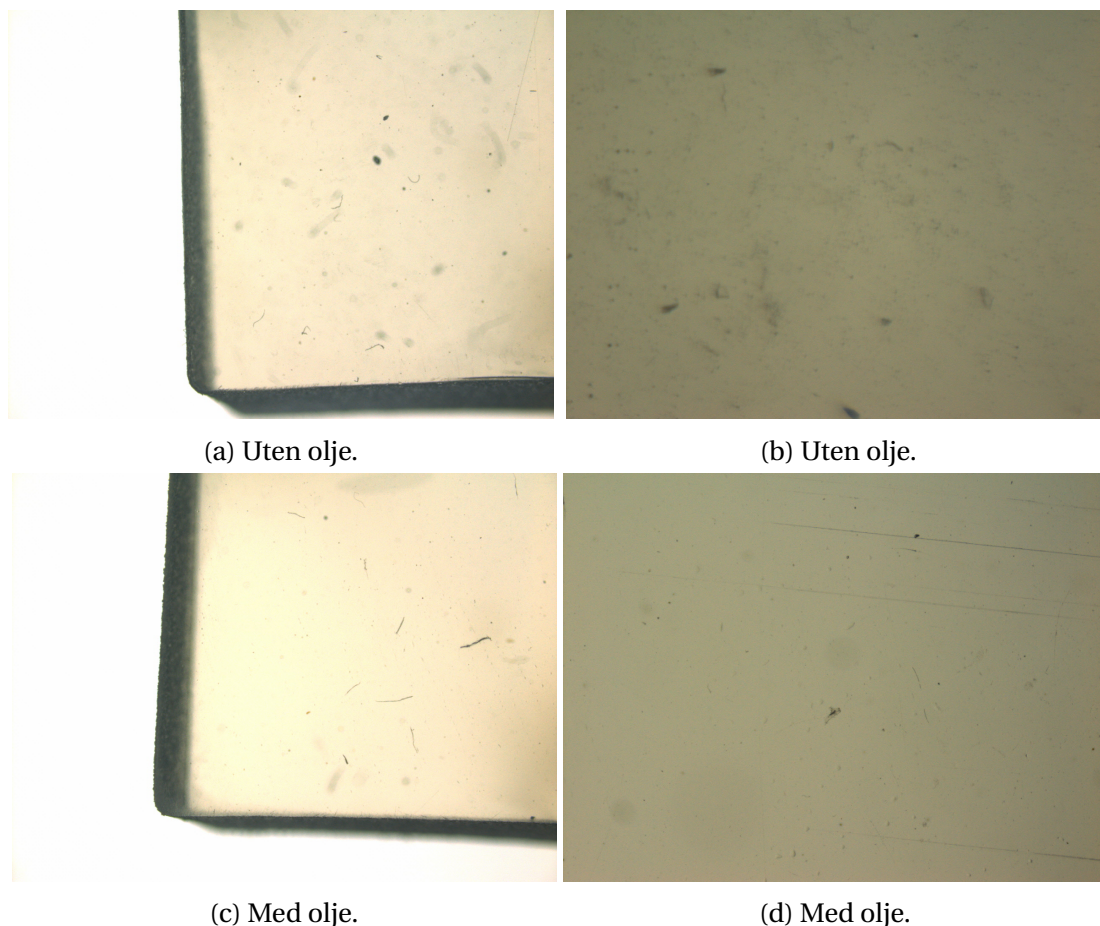
	Prøve #	Strekkraft ved brudd [N]	Prosentvis forlengelse ved brudd
Uten olje	1	24,08	369,53
	2	22,39	350,96
	3	22,05	342,75
	4	18,20	338,31
	5	19,98	357,45
Med olje	1	15,19	233,49
	2	15,05	235,03
	3	12,49	221,43
	4	14,94	249,21
	5	14,09	232,61

Tabell 4.8: Strekkmålinger.

Gjennomsnittlig strekkraft ved brudd for de tørre prøvene var 21.34 N, mens for de våte prøvene var strekkraften 14,35 N. Det vil si at de tørre prøvene tålte 48.7% mer strekkraft. De tørre prøvene ble også strekt lengre før brudd enn de våte. I gjennomsnitt ble de tørre prøvene forlenget med 351,80 % før brudd, mens de våte prøvene i snitt ble forlenget med 234.35 %. De tørre prøvene ble altså strekt 50.1 % lenger enn de våte før brudd, og det så ut til at oljen virket inn på de mekaniske egenskapene til silikonet.

Det ble også tatt bilder av to forskjellige testobjekter for diffusjon før nedsenking i olje og etter metning for å se om det var noen observerbare forandringer i silikonet.

Bildene er vist i figur 4.19.



Figur 4.19: Bilde av tørt og vått diffusjonstestobjekt. Bildene til venstre viser et hjørne av testobjektene med 13x forstørrelse. Bildene til høyre viser overflaten til silikonet og er tatt med 150x forstørrelse.

Det var vanskelig å se om oljen hadde forandret selve strukturen inne i silikonet bare ved å observere testobjektet i mikroskop. Det så ut til at testobjektene uten olje var litt mer forurenset, selv om begge testobjektene ble tørket av med isopropanol før bildene ble tatt. Det er viktig å påpeke at testobjektet i bilde (a) og (b) ikke er det samme som testobjektet i bilde (c) og (d). I figur (d) kan det observeres riper som har blitt til på grunn av pinsettet eller oljeavtørkingen, og dette kan ha virket inn på oljeopptaket i diffusjonseksperimentet.

## Diskusjon

I dette kapitlet vil resultatene diskuteres i forhold til hypotesene som er presentert i kapittel 1.3. Andre interessante resultater og utfordringer i prosjektet vil også bli belyst, og aktuelle feilkilder vil bli diskutert underveis.

### 5.1 Diffusjon

Det er vanlig å gjøre diffusjonsmålinger på tynne testobjekter slik at diffusjonsopptaket inn langs kanten av testobjektet kan neglisjeres. Diffusjonskonstanten kan da brukes til å regne ut hvor lang tid det tar til testobjekter med andre tykkelser går i metning. Siden diffusjonshastigheten øker med tykkelsen da diffusjonen også forekommer inn langs kanten av testobjektet, kan formel 2.2 og 2.3 fra kapittel 2 bare brukes på veldig tynne testobjekter. Det kan imidlertid brukes formler som tar hensyn til diffusjon inn langs kanten (kanteffekt) som kan brukes til å skalere disse formlene [4].

Siden testobjektet som ble brukt i diffusjonseksperimentet hadde en tykkelse på 6 mm var det urimelig å anta at diffusjonsopptaket av olje inn langs kanten av testobjektet kunne neglisjeres. Det er rimelig å anta at diffusjonsopptaket vil forekomme hurtigere enn for testobjekter der det blir antatt at diffusjonen kun forekommer inn gjennom de store flatene. Testobjektene som ble bruk til diffusjonseksperimentet hadde samme størrelse som testobjektene som ble brukt til elektrisk trevekst. Diffusjon av oljen inn i kanten av testobjektet ble da automatisk en del av målingene. Dette var en fordel siden resultatene ble mer nøyaktige, og eksperimentet

kun ble gjennomført for å finne en metode som skulle brukes til å lage oljemettede testobjekter for elektrisk trevekst på en effektiv måte. Diffusjonskonstanten som ble funnet kunne derfor ikke brukes for å regne ut metningsgraden av olje i testobjekter med andre tykkelser ved hjelp av formel 2.2 i kapittel 2.1. Formel 2.3 kunne imidlertid brukes til å regne ut tiden til metning av olje i testobjektene, siden testobjektene for diffusjon og elektrisk trevekst var like store.

Diffusjonsopptaket ble først gjennomført på 60°C til det var sikkerhet i at testobjektet var mettet, for så å fortsette ved 20°C til testobjektet ble mettet ved denne temperaturen. Diffusjonsopptaket hadde samme form som forventet da vektøkningen for mettet testobjekt var litt lavere ved 20°C enn 60°C. Resultatene viste også at diffusjonshastigheten var avhengig av temperaturen og metningsgraden i testobjektet, noe som stemte overens med teorien i kapittel 2.1. Dette var også grunnen til at det tok lengre tid til metning fra 60°C til 20 °C enn omvendt. Silikon tåler temperaturer mellom -55 og 210°C (se vedlegg C), så en temperatur på 60°C over en lengre periode vil ikke ødelegge silikonet. Hvilken effekt oljen hadde på silikonet vil bli diskutert senere i dette kapitlet.

Det er flere feilkilder som kunne gjøre diffusjonsmålingene unøyaktige. Elektrisk ladning ville ha påvirket mikrovekten, og det var vanskelig å vite om testobjektet hadde nøyaktig lik ladning mellom hver måling. I tillegg ble oljen tørket av overflaten på testobjektet manuelt før hver måling, og det var ikke sikkert at absolutt all oljen ble tørket av hver gang. Det var kun vektforandringen på grunn av oljen som hadde diffundert inn i testobjektet som skulle bli målt. Rusk og støvkorn kan også ha påvirket målingene, men siden testobjektet var relativt tungt ville ikke dette ha påvirket vektøkningen nevneverdig. Det manuelle arbeidet som ble utført på testobjektet fra det ble tatt ut av oljen til det ble målt var trolig den største feilkilden. Det var relativt liten forskjell mellom diffusjonsopptaket i de 5 testobjektene, og ingen målinger skilte seg ut fra resten.



## 5.2 Elektrisk trevekst

### 5.2.1 Gjennomslagsspenning og spenning ved begynnende trevekst

For å teste hypotese 1 og 2 ble Slow Rate-of-Rise Test, eller rampetestmetoden brukt til å kartlegge gjennomslagsspenning og spenningen ved begynnende trevekst. Spenningen ble gradvis skrudd opp til det ble gjennomslag i testobjektene. Ved atmosfærisk trykk ble det funnet ut at gjennomslagstyrken var høyere i alle de våte testobjektene enn i de tørre. Gjennomsnittlig gjennomslagsspenning for de våte prøvene var 14,3 kV og 10 kV for de tørre. Ved 50 bar væsketrykk var gjennomsnittlig gjennomslagsspenning hhv. 19,3 kV og 12,3 kV for de våte og tørre testobjektene. Resultatene fra rampetesten viste at hypotese 1 (a) og 1 (b) stemte. Ved atmosfærisk trykk var forskjellen i gjennomsnittlig gjennomslagsspenning 4,3 kV, og ved 50 bar var forskjellen 7 kV. Disse resultatene viste at gjennomslagsspenningen økte med både oljeinnhold og trykk. Som nevnt tidligere i teorien ville ikke trykket inne i isolasjonen være 50 bar. Resultatene tydet på at silikonet ble presset sammen slik at trykket inne i isolasjonen økte siden gjennomslagstyrken til silikonet var større ved 50 bar væsketrykk.

Rampetesten ble også brukt til å finne spenningen ved begynnende trevekst. Ved atmosfærisk trykk begynte det elektriske treet å vokse ved 4-5 kV for de tørre prøvene, og 5-6 kV for de våte prøvene. Ved 50 bar begynte det elektriske treet å vokse ved 8 kV for de tørre prøvene og 7-8 kV for de våte prøvene. Ved 50 bar ble det elektriske treet initiert ved høyere spenning, men det så ikke ut til at oljeinnholdet i prøven spilte noen rolle for når det elektriske treet begynte å vokse ved de respektive trykkene. I de våte testobjektene ble det elektriske treet initiert ved en lavere spenning enn i de tørre ved 50 bar. Siden spenningsforskjellen mellom våte og tørre testobjekter ved de respektive trykkene var så liten, var det vanskelig og si noe om hypotese 2 (a) og 2 (b) stemte. Nålpissen ble observert ved hjelp av mikroskopet, og det var vanskelig å avgjøre nøyaktig når det elektriske treet ble initiert. Dette var sannsynligvis den største feilkilden da tiden til begynnende trevekst ble kartlagt.

Som nevnt tidligere er det de lokale forholdene rundt nålpissen som avgjør når det elektriske treet initieres, og i alle de våte testobjektene ble det observert hulrom ved nålpissen. Siden silikonet var 100% mettet med olje ble det antatt at også hulrommet var fylt med olje. Olje har høyere holdfasthet enn luft [10], og hvis hulrommet hadde vært fylt med luft ville de partielle

utladningene og treveksten forekommet ved en mye lavere spenning. Det elektriske treet startet ved nålspissen, vokste gjennom hulrommet og videre gjennom isolasjonen. Hulrommet kan ha bidratt til at det lettere ble dannet små sprekker i isolasjonen, noe som igjen kunne ha ført til at de elektriske egenskapene til isolasjonen ble svekket.

Hva som forårsaket hulrommet ved nålspissen er ikke kjent, men en mulig forklaring kan være at silikonet og nålen ble utvidet ved de forskjellige temperaturene som ble brukt for å mette testobjektet med olje. Graden av ekspansjon dividert med endringen i temperatur kalles materialets koeffisient av termisk ekspansjon og varierer generelt med temperatur. For silikon i området  $0-200^{\circ}\text{C}$  er den termiske ekspansjonskoeffisienten  $30,87 * 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$  [25], mens den er  $1,74 * 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$  for rustfritt stål [26]. Dette avhenger litt av typen silikon og rustfritt stål, men resultatene fra [25, 26] viser tydelig at den termiske ekspansjonskoeffisienten er større for polymerer enn metaller. Da testobjektene ble avkjølt fra  $60^{\circ}\text{C}$  til  $20^{\circ}\text{C}$  kunne silikonet ha vært mer utvidet enn nålen, og ikke krympet tilbake til sin opprinnelige form. Siden av nålen ble pusset med grovt sandpapir før støping slik at det ble god heft mot silikonet, men nålspissen ble ikke pusset. Det ble kun observert hulrom ved nålspissen, mens resten av nålen satt godt fast i isolasjonen for de våte testobjektene. Hulrommet kunne kanskje vært unngått hvis alle testobjektene hadde blitt mettet ved  $20^{\circ}\text{C}$ , men det ble valgt en temperatur på  $60^{\circ}\text{C}$  for at testobjektene skulle bli mettet innen tidsbegrensingen gitt i denne oppgaven.

### 5.2.2 Lengdeutvikling

Utseende til det elektriske treet og vekstutviklingen i de 4 testtypene varierte veldig. Det var ikke forventet at treveksten skulle foregå på samme måte siden noen testobjekter ble testet under trykk, og noen testobjekter var mettet med olje. De to variablene gjorde det vanskelig å sammenligne treveksten i testobjektene, i tillegg til at forsøkene ble gjennomført ved ulike spenninger. Gjennomslagsspenningen og spenningen ved begynnende trevekst var så forskjellige i de 4 testene at dette var nødvendig. Spenningen avgjorde hvor raskt det elektriske treet vokste gjennom silikonet siden det elektriske feltet ved nålspissen økte lineært med påtrykket spenning (se kapittel 3.1.2). Spenningen ble valgt slik at det elektriske treet skulle initierts med en gang spenningen ble skrudd på, og det var også tilfelle i alle testobjektene. Etter at det elektriske treet begynner å vokse er de lokale geometriske forholdene ved enden av treet med på å avgjøre hvordan treveksten utvikler seg [5].

### **Langtidstesting ved 1 bar**

Ved sammenligning av tørre og våte testobjekter ved 1 bar var det tydelig at oljeinnholdet i silikonet påvirket den elektriske treveksten. Holdfastheten var høyere og treveksten foregikk like ved nålspissen i de oljemettede testobjektene. I rampetesten ble det kun observert trevekst like ved nålspissen i de våte prøvene før det elektriske treet hurtig vokste gjennom isolasjonen da gjennomslagsspenningen ble nådd. Dette ble også observert i testobjekt nr 7 under langtidstesting. Treveksten ville trolig forekommet på samme måte i de andre våte testobjektene dersom en høyere spenning hadde blitt brukt. Da silikonet var 100% mettet med olje kunne de små hulrommene som ble dannet i isolasjonen som følge av PD ha blitt fylt med olje isteden for luft. Dette ville ført til at holdfastheten til isolasjonen økte, og dette er en mulig forklaring på hvorfor de våte testobjektene hadde en høyere holdfasthet enn de tørre. I de tørre testobjektene foregikk heller ikke treveksten med jevn hastighet gjennom isolasjonen. Det elektriske treet vokste raskt i starten før veksten stagnerte. Det ble foreslått at denne stagneringen skyldes lite karboninnhold i silikonet, noe som gjorde ledningsevnen i trekanalen dårlig [5].

### **Langtidstesting ved 50 bar**

Det var også forskjell mellom de våte og tørre testobjektene ved 50 bar. Ved 50 bar ble det generelt brukt høyere spenninger fordi gjennomslagsspenningen og spenningen ved begynnende trevekst 50 bar var høyere. Det så ut til at et høyere trykk gjorde at holdfastheten i isolasjonen økte. Hvis trykket var konstant og hulrommet i isolasjonen ble mindre på grunn av sammenpressing kan dette sees på som en forflytning til venstre i Paschenkurven.

### **Tørre testobjekter**

Det var lettest å observere en forskjell i vekstutviklingen for de tørre prøvene ved 1 og 50 bar. Ved 1 bar vokste det elektriske treet omvendt eksponentielt med hensyn på tiden i både bredden og lengden de første minuttene. Dette ble også observert ved 50 bar. Veksten stagnerte i begge tilfeller, men ved 50 bar stanset ikke veksten helt. Ved 50 bar fortsatte treveksten gjennom isolasjonen, men med en mye lavere hastighet enn de første minuttene. En mulig forklaring på dette kan være at det eksterne trykket presset isolasjonen sammen, og dermed kunne noe av gassen inne i trekanalen ha blitt presset ut av den. Dette ville ha ført til at det ble mindre gass i trekanalen og det elektriske treet begynte da å vokse igjen. Ved

å se på vekstutviklingen i både lengde og bredden i figur 4.7 og 4.12 ser det ut til at veksten stanset og begynte igjen to ganger. Dette skjedde ved ca. 10-15 minutter og ca. 15-35 minutter. Rett før gjennomslag vokste treet raskt gjennom siste del av silikonet før den nådde jord og gjennomslag inntraff.

Ved 1 bar ble det også observert flere små trekanaler og mer buskvekst enn ved 50 bar. Ved å se på bildene i figur 4.11 er det tydelig at forbrenningen av silikon økte da det sto spenning over testobjektet uten at treet vokste hverken i bredden eller lengden. Spenningen sto også på i 120 minutter over alle testobjektene utenom testobjekt nr 1 ved 1 bar. Ved 50 bar ble det gjennomslag i alle tørre testobjekter innen 42 minutter. Det at spenningen sto på mye lengre ved 1 bar kan også forklare hvorfor det ble observert mer buskvekst i silikonet.

Det ble også observert at gjennomslagskanalen var mye større og tykkere ved 1 bar enn 50 bar. Det styrket teorien om at trykket presset silikonet og trekanalen sammen.

### Våte testobjekter

Det var vanskelig å sammenligne treveksten i de våte testobjektene ved forskjellige trykk siden det elektriske treet kun vokste gjennom en liten del av isolasjonen. Treveksten foregikk kun ved nålspissen for alle våte testobjekter bortsett fra testobjekt nr 7 der det elektriske treet plutselig penetrerte isolasjonen med stor hastighet. De våte testobjektene inneholdt mer karbon enn de tørre på grunn av oljen, og det kan ha ført til at trekanalen ble mer ledende. Ved 50 bar ble det først prøvd å gjennomføre langtidstesting ved 18 kV. Det ble gjennomslag i første testobjekt etter 2 minutter og 17 sekunder. I det ene testobjektet som ble testet ved 17 kV ble det ikke gjennomslag i løpet av 60 timer, 1 minutt og 45 sekunder. Dette viste at en relativt liten spenningsforandring hadde stor innvirkning på levetiden.

Ut i fra resultatene og diskusjonen kan det konkluderes med at hypotese nr 3 ikke stemmer.

### 5.2.3 Temperatur og statistikk

Alle forsøkene med elektrisk trevekst ble gjennomført ved omgivelsestemperatur. I en undervannskabel vil temperaturen blant annet avhenge av laststrømmen, og temperaturen vil påvirke resultatene i eksperimentene som ble gjennomført. Dette gjaldt spesielt for oljeopptaket som vist i diffusjonsanalysen.

Ellers har det tatt veldig lang tid å lage testobjekter som ble brukt i forsøkene med elektrisk

trevekst. Dette var det flere årsaker til. For det første måtte det designes og lages en støpeform som gjorde at nålen ikke ble bøyd under støping. Det tok tid å klargjøre silikonet som skulle brukes i støpeformen og i tillegg tok det tid å støpe testobjektene enkeltvis. Det tok også over 40 dager å mette testobjektene med olje.

Det har i alt blitt gjennomført rampetester og langtidstesting på tilsammen 30 testobjekter. Disse har i tillegg blitt testet på 4 forskjellige måter, noe som gjorde at det ikke har blitt gjennomført et tilfredsstillende antall forsøk for å få en god statistikk. For å få en god statistikk er det nødvendig å repetere forsøkene mange ganger, slik at et avvikende resultat ikke påvirker sluttstatistikken. Dette gjelder spesielt for elektrisk trevekst siden det er et stokastisk fenomen som vanskelig lar seg beskrive av matematiske modeller.

#### **5.2.4 Mikroskopet**

I mikroskopet ble det brukt et objektiv med mulighet for 40 ganger forstørrelse, og denne forstørrelsen ble brukt til å ta alle bildene av elektrisk trevekst. Det ble forsøkt å bruke et objektiv med mulighet for 100 ganger forstørrelse, men avstanden fra utsiden av tanken og inn til testobjektet var i underkant av 5 cm. Det var ikke mulig å bruke dette objektivet siden det ville ha krevd en mindre avstand mellom testobjektet og objektivet for å fokusere på nål-plategapet. Objektivet med 40 ganger forstørrelse måtte stå ca. 3 cm utenfor veggen til tanken for at det skulle bli skarpe bilder, men nål-plategapet dekte bare halve skjermen på mikroskopet. Det hadde sannsynligvis vært bedre å bruke et objektiv med mellom 40 og 100 ganger forstørrelse for at bildet av treveksten skulle blitt bedre. Det hadde ført til større bilder og økt nøyaktighet i analysen av det elektriske treet. Et slikt objektiv ble imidlertid ikke funnet eller anskaffet.

Det ble også forsøkt å ta video av treveksten siden det ble valgt å fokusere spesielt på startfasen. Det viste seg at oppløsningen på filmen som ble tatt var så liten at det elektriske treet knapt syntes. Løsningen ble å ta bilder av nål-plategapet hvert 15. sekund. Mikroskopet kunne ikke ta bilder med en raskere frekvens enn dette for å få bilder med tilfredsstillende oppløsning. Dette viste seg å være en grei løsning, og det elektriske treet kunne observeres kontinuerlig på skjermen selv om det ikke ble tatt mer enn 4 bilder i minuttet.

### 5.3 Mekaniske egenskaper

Strekktestene var kun en liten del av oppgaven og ble gjennomført for å undersøke hypotesen om at oljen forandrer de mekaniske egenskapene til silikonet. Resultatene sier også noe om mykheten i silikonet, og kan brukes som et argument for påstanden om at trevekstkanalen presses sammen når trykket øker.

Ut i fra resultatene i strekktesten så det ut til at oljeinnholdet påvirket de mekaniske egenskapene til silikonet. Dette kan sees ved at de tørre testobjektene kunne strekkes lenger i tillegg til at strekkraften ved brudd var større for disse prøvene. Det ble gjennomført 5 målinger på våte testobjekter og 5 målinger på tørre testobjekter og resultatene var innenfor samme størrelsesorden for de respektive målingene. Det er derfor grunn til å tro at resultatene er pålitelige og at hypotese nr 4 stemmer. Testobjektene for diffusjon kjentes også mer bøyelige ut da de var mettet med olje. Hundebestestobjektene ble mettet på samme måte som testobjektene for diffusjon, men det er ikke grunn til å tro at temperaturen på 60°C kan ha påvirket de mekaniske egenskapene siden silikonet tåler temperaturer på opp til 210°C. Hva oljen gjorde med silikonet var imidlertid ukjent, men en mulighet var at oljen tok opp plass mellom molekylene i silikonet og gjorde bindingene mellom molekylene svakere. Det kan også være en mulighet for at oljen brøt opp bindingene inne i silikonmolekylet.

### 5.4 Testobjektene

En stor feilkilde i eksperimentene som ble gjennomført var testobjektene. Dette gjaldt både for diffusjonsanalysen og strekktestene, og dette var trolig den største feilkilden i trevekstanalysen. Det var vanskelig å lage testobjektene 100% like, og det var vanskelig å oppdage små hulrom eller deformasjoner bare ved å se på testobjektene i mikroskop.

Pinsettet og papiret som ble brukt til å tørke av olje kan ha laget riper i testobjektene for diffusjon og dette kan ha ført til at oljeopptaket økte i disse prøvene. Siden testobjektene i diffusjonsanalysen var relativt tunge og oljeopptaket var i samme størrelsesorden hadde riper trolig ikke påvirket resultatene i nevneverdig grad.

I forsøkene med elektrisk trevekst var nålen og området rundt denne trolig den største feilkilden. Ulik lengde i nål-plategapet og radius på nålen ville ha vært med på å bestemme feltstyrken. Avstanden mellom elektrodene ble målt med mikroskop før og etter støping, og

testobjekter med avstand utenfor nøyaktighetsmarginen ble vraket. Nåler med deformert spiss ble kastet. Det ble antatt at alle nålene hadde lik radius, selv om radiusen bare ble målt på en nål.

Testobjektene som ble brukt i strekktesten burde også være helt like for å få pålitelige resultater. Disse testobjektene var 0,5 mm tykke, og strekkraften vil nødvendigvis være avhengig av tykkelsen. Tykkelsen til alle testobjekter ble målt, men siden testobjektene var så tynne var denne vanskelig å måle denne nøyaktig. En liten deformasjon eller rift i testobjektet ville også ha påvirket resultatene i strekktesten, men det ble ikke observert skader på testobjektene da de ble undersøkt med mikroskopet før strekkmålingene.

---



# Konklusjon

## 6.1 Konklusjon

Det meste av tiden gikk med til å lage testobjekter, og å sette opp testoppsettet for elektrisk trevekst under trykk. Trevekstforsøk med trykk og olje har sannsynligvis ikke blitt gjennomført tidligere, og en del av oppgaven var å se om det faktisk var mulig å lage et testoppsett for å gjennomføre slike eksperimenter. Noen av resultatene er derfor unike i forskningssammenheng, og testoppsettet kan brukes til videre forskning også på andre typer isolasjonsmaterialer som brukes i subseakonnektorer. Resultatene fra forsøkene tydet på følgende:

- Det tok omtrent 40 dager å mette de 6x24x26 mm store testobjektene som ble brukt til forsøk med elektrisk trevekst. Dette gjaldt om de lå 10 dager i olje som holdt en temperatur på 60 °C, og deretter 30 dager i olje som holdt en temperatur på 20 °C. Det var mulig at denne metoden gjorde at det ble hulrom rundt nålspissen i testobjektet, noe som kan ha påvirket initieringen av det elektriske treet. Gjennomsnittlig diffusjonskonstant for disse testobjektene ved 60 °C var  $3.06 * 10^{-11} \frac{m^2}{s}$ .
- Det så ikke ut til at oljeinnholdet hadde stor betydning for spenningen ved begynnende trevekst ved hverken atmosfærisk trykk eller 50 bar væsketrykk. Alle våte testobjekter hadde hulrom rundt nålspissen, men siden de var mettet med olje ble det antatt at også hulrommet var fylt med olje.
- Gjennomslagsspenningen var høyere for silikon som var mettet med olje enn silikon

som ikke inneholdt olje. Dette gjaldt både ved atmosfærisk trykk og 50 bar væsketrykk. Årsaken kan ha vært at oljen fylte opp hulrommene som ble dannet ved partielle utladninger, og olje har høyere holdfasthet enn luft.

- Gjennomsnittlig gjennomslagsspenning fra rampetesten er gjengitt i tabellen under. Hver testtype ble repetert 4 ganger.

	Uten olje	Med olje
1 bar	10,0 kV	14,3 kV
50 bar	12,3 kV	19,3 kV

Tabell 6.1: Gjennomsnittlig gjennomslagsspenning.

- Strukturen og vekstutviklingen i bredden og lengden var avhengig av:
  1. trykket rundt testobjektet
  2. oljeinnholdet i testobjektet
- I de våte testobjektene vokste det elektriske treet kun et lite stykke ut fra nålspissen før veksten stagnerte. I de tilfelle gjennomslag inntraff vokste det elektriske treet meget hurtig gjennom siste del av isolasjonen. Dette ble observert både ved atmosfærisk trykk og 50 bar væsketrykk.
- I de tørre testobjektene vokste det elektriske treet med omvendt eksponentiell hastighet med hensyn på tiden i både lengde og bredde retning de første minuttene. Ved atmosfærisk trykk stagnerte veksten, mens forbrenningen i trekanalen som hadde blitt utviklet fortsatte. Ved 50 bar væsketrykk stagnerte også veksten, men den stanset ikke helt. Treveksten fortsatte med varierende hastighet gjennom resten av isolasjonen. Dette kan ha skyldes at trykket presset trekanalen sammen og dermed kunne gassen inne i trekanalen ha blitt presset ut av den.
- Resultatene fra strekktesten viste at oljen påvirket de mekaniske egenskapene til silikon, uten at det lyktes å finne ut hva oljen gjorde med silikonet.
- Det ble litt knapt med tid til å gjennomføre mange tester med elektrisk trevekst. Flere tester hadde gitt et bedre statistisk grunnlag for konklusjonen, men liten variasjon tydet på at resultatene var pålitelige.

## 6.2 Videre arbeid

For å få et bedre statistisk grunnlag er det nødvendig å repetere testene med elektrisk trevekst flere ganger. Det kunne også vært interessant å gjennomføre langtidstesting ved andre spenningsnivåer som kanskje hadde gitt resultater som lettere lot seg sammenligne.

Det er aktuelt å mette testobjektene av silikon med olje ved en annen temperatur for å se om det er temperaturforandringen, oljen eller begge deler som forårsaker hulrommet ved nålpissen. Det hadde også vært mulig å lage testobjekter med mindre størrelse for at de raskere skulle gå i metning. Isåfall må det lages et nytt stativ inne i trykktanken der disse testobjektene passer.

Testoppsettet kan også brukes til å teste elektrisk trevekst under trykk for også andre isolasjonsmaterialer som f.eks. epoksy.

Trykktanken er dimensjonert for å tåle trykk opp til 150 bar. Det kunne vært interessant å gjennomføre forsøk med elektrisk trevekst ved andre trykk for å f.eks. finne ut om gjennomslagsspenningen øker proporsjonalt med trykket.

---

# Litteraturliste

- [1] Rune Gravaune. Elektrisk trevekst i isolasjonsmateriale for høyspenning subsea ac konnektorer. *NTNU*, 2014.
- [2] Kristian Fauskanger. Elektrisk trevekst i kryssbundet polyetylen (pex) kabelisolasjon ved ulike spenninger og frekvenser. 2013.
- [3] *SpecTron Medium and High Power Electrical Connencor Systems*.
- [4] Jeannie Urquhart Bruce Duncan and Simon Roberts. Review of measurement and modelling of permeation and diffusjon in polymers. Technical report, 2005.
- [5] B.X. Du, Z.L. Ma, and Y. Gao. Phenomena and mechanism of electrical tree in silicone rubber. In *Properties and Applications of Dielectric Materials, 2009. ICPADM 2009. IEEE 9th International Conference on the*, pages 37–40, July 2009.
- [6] B.X. Du, Z.L. Ma, Y. Gao, and T. Han. Effect of ambient temperature on electrical treeing characteristics in silicone rubber. *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, 18(2):401–407, April 2011.
- [7] A S Malonvski M D Noskov, M Sack and A J Schwab. Measurement and simulation of electrical tree growth and partial discharges activity in epoxy resin. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2001.
- [8] Chi-Hung Shen and George S Springer. Moisture absorption and desorption of composite materials. *Journal of Composite Materials*, 10(1):2–20, 1976.
- [9] Th.E.M. ten Hulscher and G. Cornelissen. Effect of temperature on sorption equilibrium and sorption kinetics of organic micropollutants - a review. *Chemosphere*, 32(4):609 – 626, 1996.

- 
- [10] Erling Ildstad. *TET 4160 High Voltage Insulating Materials*. NTNU, 2012.
- [11] M.Nawta H.Kawamura and M.Ieda. Voltage and temperature dependence of treeing breakdown in plastic insulators. Technical report, Internationales Symposium Hochspannungstechnik, Munchen, 1972.
- [12] Ketil Stokland. Elektrisk trevekst i ekstrudert polypropylen (pp) kabelisolasjon. 2010.
- [13] Len A Dissado and John C Fothergill. *Electrical degradation and breakdown in polymers*. Number 9. IET, 1992.
- [14] Ulrich Stroth. Materialen zu vorlesungen der plasmaphysik. [http://www.ipf.uni-stuttgart.de/lehre/plasmaphys/p70\\_03.html](http://www.ipf.uni-stuttgart.de/lehre/plasmaphys/p70_03.html), 05.10.14.
- [15] Erling Ildstad, Kristian Fauskanger, and Jorunn Holto. Electrical treeing from needle implants in xlpe during very low frequency (vlf) voltage testing. In *Solid Dielectrics (ICSD), 2013 IEEE International Conference on*, pages 800–803. IEEE, 2013.
- [16] Erling Ildstad and Faremo Halvard. Electrical treeing and field restoration of water treed xlpe cables. In *NORD-IS96*.
- [17] Hallvard Faremo and Erling Ildstad. Rehabilitation of water tree aged xlpe cable insulation. In *Electrical Insulation, 1994., Conference Record of the 1994 IEEE International Symposium on*, pages 188–192. IEEE, 1994.
- [18] H.-Z. Ding and B.R. Varlow. Mechanically prestressed composite dielectrics and improvement of electrical tree growth resistance. In *Solid Dielectrics, 2004. ICSD 2004. Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on*, volume 2, pages 775–779 Vol.2, July 2004.
- [19] Xiaoquan Zheng and George Chen. Propagation mechanism of electrical tree in xlpe cable insulation by investigating a double electrical tree structure. *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, 15(3):800–807, 2008.
- [20] *Fluid Mechanics: Fundamentals and Application*. McGraw Hill Higher Education, 2011.
- [21] G. Berg, H.H. Saeternes, J. Aakervik, and S. Hvidsten. The effect of hydrostatic pressure on electrical treeing in silicone cable joints. In *Electrical Insulation (ISEI), Conference Record of the 2012 IEEE International Symposium on*, pages 609–612, June 2012.
-

- 
- [22] KC Kao, HK Xie, and DM Tu. Electrical treeing in polyethylene under hydrostatic pressures. *Journal of electrostatics*, 16(1):115–121, 1984.
- [23] Johannes Skaar. *TFE 4120 Elektromagnetisme*. NTNU, 2012.
- [24] Test method for dielectric breakdown voltage and dielectric strength of solid electrical insulating materials at commercial power frequencies, astm international d 149-97a, 2009.
- [25] LC Sim, SR Ramanan, H Ismail, KN Seetharamu, and TJ Goh. Thermal characterization of al<sub>2</sub>o<sub>3</sub> and zno reinforced silicone rubber as thermal pads for heat dissipation purposes. *Thermochimica acta*, 430(1):155–165, 2005.
- [26] Dean Deng and Hidekazu Murakawa. Numerical simulation of temperature field and residual stress in multi-pass welds in stainless steel pipe and comparison with experimental measurements. *Computational materials science*, 37(3):269–277, 2006.

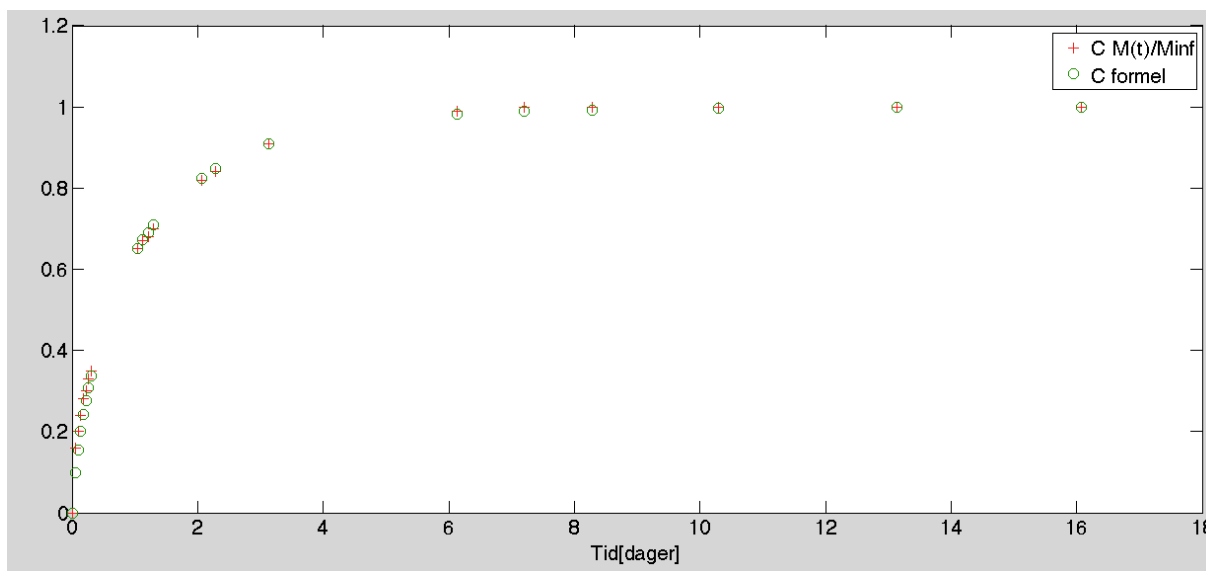
---



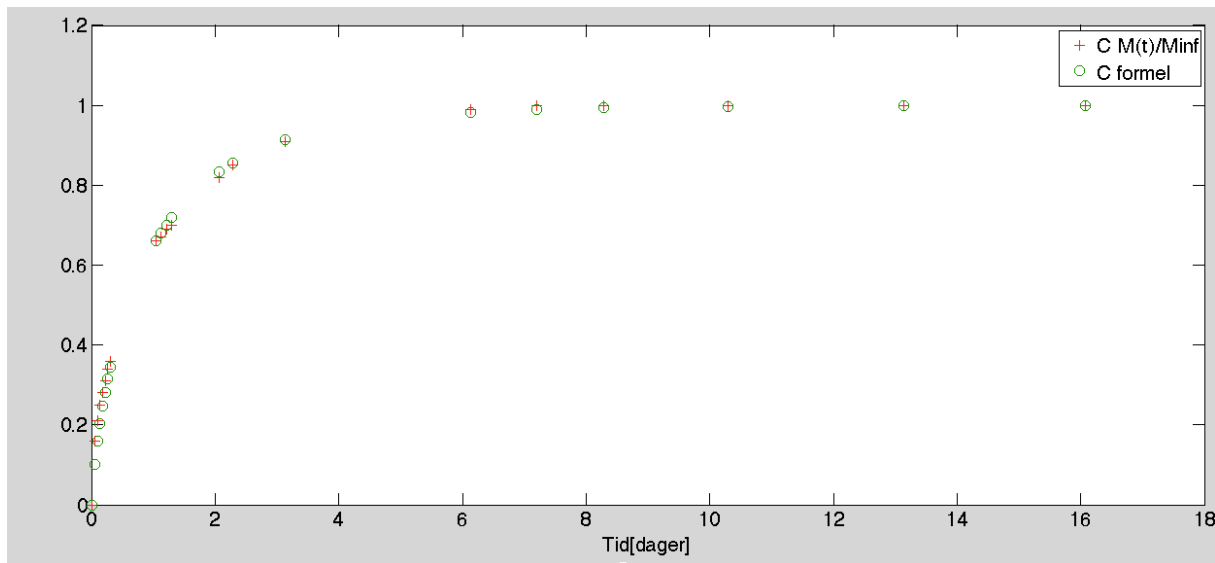
# Diffusjon

## A.1 Kurvetilnæringsplotting for diffusjonskonstanter

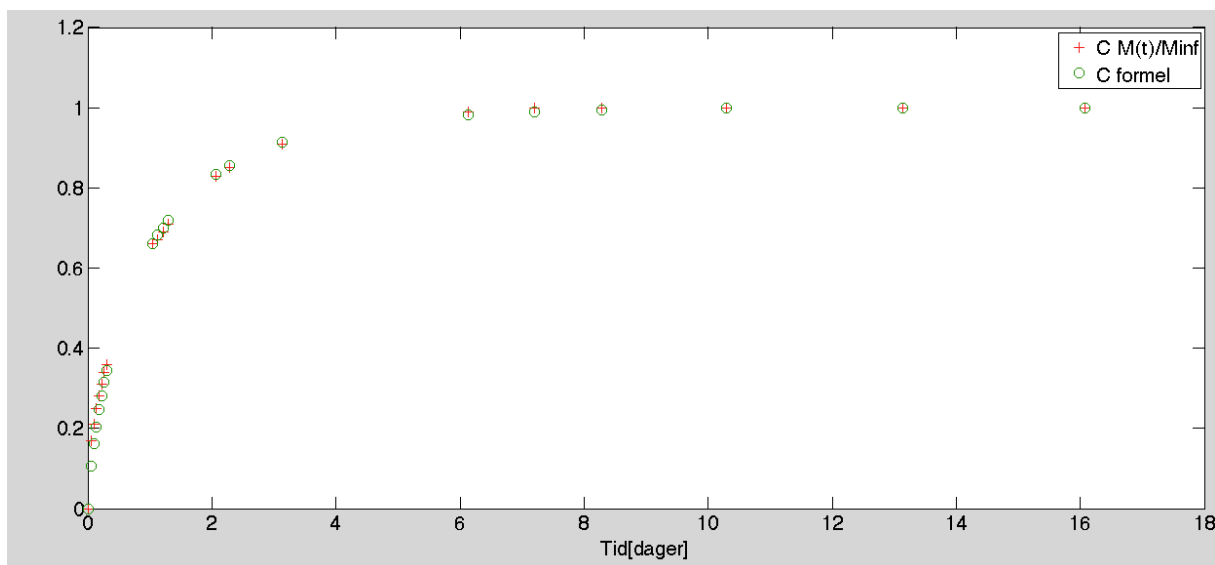
Vedlagt finnes kurvetilnæringsplottene som er brukt for å finne diffusjonskonstantene i silikon.  $C M(t)/M_{inf}$  er målt vekt delt på vekten ved metning, og  $C$  formel er plottet av ligning 2.2. Diffusjonskonstanten er gjengitt under hver figur og er målt ved 60 °C. Alle testobjektene var 6 mm tykke.



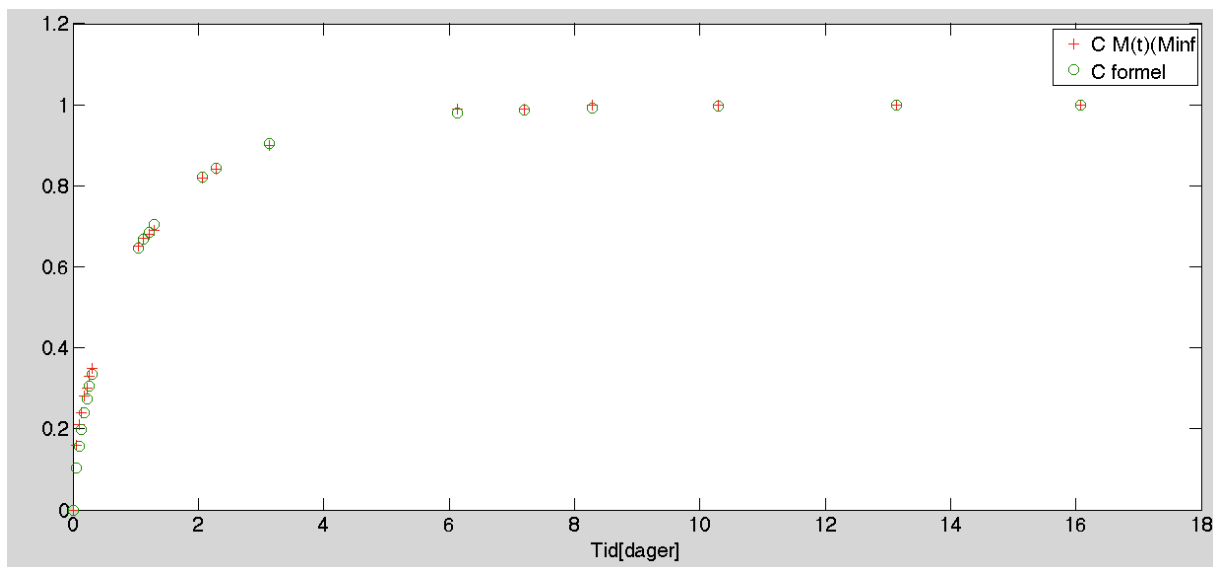
Figur A.1: Silikon testobjekt nr 1. Diffusjonskonstanten ble målt til  $3.01 \cdot 10^{-11} \frac{m^2}{s}$ .



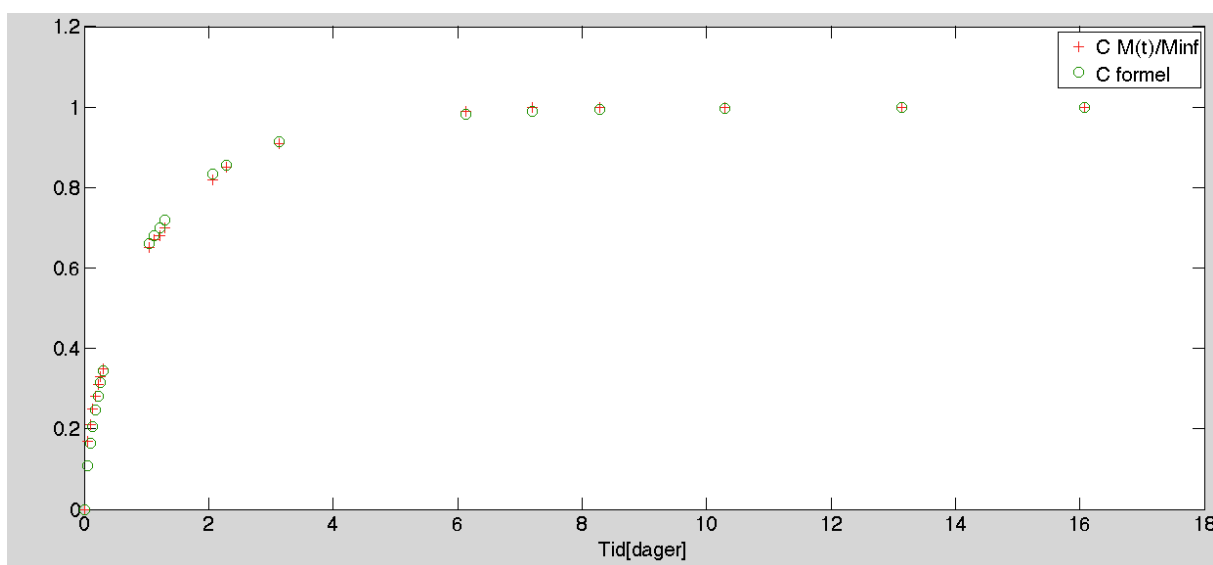
Figur A.2: Silikon testobjekt nr 2. Diffusjonskonstanten ble målt til  $3.11 \cdot 10^{-11} \frac{m^2}{s}$ .



Figur A.3: Silikon testobjekt nr 3. Diffusjonskonstanten ble målt til  $3.12 \cdot 10^{-11} \frac{m^2}{s}$ .



Figur A.4: Silikon testobjekt nr 4. Diffusjonskonstanten ble målt til  $2.95 \cdot 10^{-11} \frac{m^2}{s}$ .



Figur A.5: Silikon testobjekt nr 5. Diffusjonskonstanten ble målt til  $3.11 \cdot 10^{-11} \frac{m^2}{s}$ .

## A.2 Måledata for diffusjonseksperiment

Tid[dager]	Vekt[mg]	Vektøkning[%]
0.00	3.7676	0.00
0.05	3.8090	1.10
0.09	3.8218	1.44
0.13	3.8312	1.69
0.18	3.8405	1.93
0.22	3.8481	2.14
0.26	3.8549	2.32
0.30	3.8605	2.47
1.05	3.9405	4.59
1.13	3.9445	4.70
1.21	3.9485	4.80
1.30	3.9525	4.91
2.05	3.9852	5.78
2.28	3.9908	5.92
3.13	4.0075	6.37
6.14	4.0295	6.95
7.20	4.0315	7.00
8.29	4.0320	7.02
10.29	4.0326	7.03
13.14	4.0329	7.04
16.08	4.0321	7.02
21.02	4.0330	7.04
21.07	4.0268	6.88
21.14	4.0240	6.81
21.20	4.0213	6.73
21.27	4.0199	6.70
22.09	4.0036	6.26
22.15	4.0024	6.23

22.22	4.0018	6.22
23.11	3.9908	5.92
27.13	3.9667	5.28
28.03	3.9641	5.22
29.13	3.9597	5.10
31.13	3.9536	4.94
34.04	3.9489	4.81
49.18	3.9441	4.68
52.17	3.9442	4.69
59.04	3.9443	4.69

Tabell A.1: Diffusjonsdata for prøve #1.

---

Tid[dager]	Vekt[mg]	Vektøkning[%]
0.00	3.7680	0.00
0.05	3.8110	1.14
0.09	3.8237	1.48
0.13	3.8335	1.74
0.18	3.8424	1.97
0.22	3.8499	2.17
0.26	3.8570	2.36
0.30	3.8625	2.51
1.05	3.9419	4.62
1.13	3.9460	4.72
1.21	3.9501	4.83
1.30	3.9540	4.94
2.05	3.9865	5.80
2.28	3.9920	5.94
3.13	4.0102	6.43
6.14	4.0308	6.97
7.20	4.0326	7.02

---

8.29	4.0332	7.04
10.29	4.0335	7.05
13.14	4.0338	7.05
16.08	4.0330	7.03
21.02	4.0336	7.05
21.07	4.0278	6.89
21.14	4.0243	6.80
21.20	4.0219	6.74
21.27	4.0194	6.67
22.09	4.0037	6.26
22.15	4.0028	6.23
22.22	4.0021	6.21
23.11	3.9915	5.93
27.13	3.9668	5.28
28.03	3.9643	5.21
29.13	3.9596	5.08
31.13	3.9541	4.94
34.04	3.9493	4.81
49.18	3.9443	4.68
52.17	3.9445	4.68
59.04	3.9447	4.69

Tabell A.2: Diffusjonsdata for prøve #2.

---

Tid[dager]	Vekt[mg]	Vektøkning[%]
0.00	3.7612	0.00
0.05	3.8054	1.18
0.09	3.8170	1.48
0.13	3.8264	1.73
0.18	3.8360	1.99

---

---

0.22	3.8431	2.18
0.26	3.8500	2.36
0.30	3.8557	2.51
1.05	3.9343	4.60
1.13	3.9380	4.70
1.21	3.9425	4.82
1.30	3.9470	4.94
2.05	3.9779	5.76
2.28	3.9837	5.92
3.13	4.0010	6.38
6.14	4.0211	6.91
7.20	4.0227	6.95
8.29	4.0243	7.00
10.29	4.0240	6.99
13.14	4.0248	7.01
16.08	4.0238	6.98
21.02	4.0237	6.98
21.07	4.0184	6.84
21.14	4.0148	6.74
21.20	4.0126	6.68
21.27	4.0099	6.61
22.09	3.9941	6.19
22.15	3.9937	6.18
22.22	3.9932	6.17
23.11	3.9822	5.88
27.13	3.9578	5.23
28.03	3.9547	5.14
29.13	3.9508	5.04
31.13	3.9446	4.88
34.04	3.9403	4.76
49.18	3.9351	4.62

52.17	3.9351	4.62
59.04	3.9350	4.62

Tabell A.3: Diffusjonsdata for prøve #3.

Tid[dager]	Vekt[mg]	Vektøkning[%]
0.00	3.7845	0.00
0.05	3.8283	1.16
0.09	3.8407	1.49
0.13	3.8500	1.73
0.18	3.8583	1.95
0.22	3.8657	2.15
0.26	3.8734	2.35
0.30	3.8780	2.47
1.05	3.9581	4.59
1.13	3.9626	4.71
1.21	3.9660	4.80
1.30	3.9701	4.90
2.06	4.0027	5.77
2.28	4.0082	5.91
3.13	4.0257	6.37
6.14	4.0489	6.99
7.20	4.0503	7.02
8.29	4.0510	7.04
10.29	4.0516	7.06
13.14	4.0522	7.07
16.08	4.0522	7.07
21.02	4.0522	7.07
21.08	4.0469	6.93
21.14	4.0439	6.85
21.20	4.0411	6.78



21.27	4.0390	6.72
22.09	4.0228	6.30
22.16	4.0228	6.30
22.22	4.0220	6.28
23.11	4.0116	6.00
27.13	3.9865	5.34
28.03	3.9836	5.26
29.13	3.9797	5.16
31.13	3.9739	5.00
34.04	3.9692	4.88
49.18	3.9630	4.72
52.17	3.9633	4.72
59.04	3.9632	4.72

Tabell A.4: Diffusjonsdata for prøve #4.

Tid[dager]	Vekt[mg]	Vektøkning[%]
0.00	3.7704	0.00
0.05	3.8144	1.17
0.10	3.8269	1.50
0.13	3.8359	1.74
0.18	3.8445	1.97
0.22	3.8518	2.16
0.26	3.8586	2.34
0.30	3.8636	2.47
1.05	3.9431	4.58
1.13	3.9474	4.69
1.21	3.9513	4.80
1.30	3.9557	4.91
2.06	3.9881	5.77
2.28	3.9939	5.93

3.13	4.0121	6.41
6.14	4.0332	6.97
7.20	4.0348	7.01
8.29	4.0351	7.02
10.29	4.0355	7.03
13.14	4.0355	7.03
16.08	4.0348	7.01
21.02	4.0350	7.02
21.08	4.0293	6.87
21.14	4.0262	6.78
21.20	4.0241	6.73
21.27	4.0219	6.67
22.09	4.0069	6.27
22.15	4.0060	6.25
22.22	4.0054	6.23
23.11	3.9947	5.95
27.13	3.9703	5.30
28.03	3.9674	5.22
29.13	3.9626	5.10
31.13	3.9572	4.95
34.04	3.9522	4.82
49.18	3.9469	4.68
52.17	3.9467	4.68
59.04	3.9469	4.68

Tabell A.5: Diffusjonsdata for prøve #5.

## Elektrisk Trevekst

Her finnes data som er brukt til å lage grafer av bredde og lengdeutvikling for:

1. Tørr silikon ved atmosfærisk trykk.
2. Våt silikon ved atmosfærisk trykk.
3. Tørr silikon ved 50 bar trykk.
4. Våt silikon ved 50 bar trykk.















Tid	Lengde [%]				Bredde [µm]			
	nr9	nr10	nr11	nr12	nr9	nr10	nr11	nr12
0.00	0	0	0	0	0	0	0	0
0.25	9	13	8	13	143	115	159	109
0.50	20	21	13	18	357	308	222	364
0.75	21	31	21	24	500	385	254	436
1.00	23	35	24	24	536	462	286	436
1.25	23	38	24	25	536	462	286	436
1.50	26	48	24	25	536	462	286	436
1.75	26	52	24	27	536	538	381	436
2.00	26	54	24	27	536	538	381	509
2.25	26	54	24	31	536	538	381	509
2.50	26	54	24	33	536	538	381	509
2.75	26	54	24	33	536	538	444	545
3.00	27	54	24	33	536	538	444	545
3.25	28	54	24	33	536	538	444	545
3.50	29	54	24	33	571	615	444	545
3.75	30	54	24	33	571	615	444	545
4.00	30	54	24	33	571	615	444	582
4.25	30	54	24	33	607	615	444	582
4.50	30	54	24	33	679	615	508	582
4.75	30	54	24	35	679	615	540	582
5.00	30	54	24	36	679	615	603	582
5.25	32	54	25	38	679	615	603	582
5.50	32	54	27	40	679	615	603	582
5.75	34	54	27	40	750	615	603	582
6.00	36	54	27	40	750	615	603	582
6.25	38	54	29	40	750	615	603	582
6.50	38	54	29	40	750	615	603	582
6.75	39	54	29	40	750	615	603	582
7.00	45	54	29	40	857	615	603	582
7.25	46	54	29	40	857	615	603	582
7.50	46	54	29	44	893	615	603	618
7.75	46	54	29	45	893	731	603	673
8.00	46	54	29	45	893	885	603	727
8.25	46	54	29	45	893	885	603	800
8.50	46	54	29	45	893	885	635	873
8.75	46	54	32	45	893	885	635	909
9.00	48	54	32	45	893	885	635	982
9.25	48	54	32	45	893	885	635	1036
9.50	48	54	32	45	893	885	635	1091
9.75	48	54	32	45	946	885	635	1164
10.00	48	54	32	45	1000	885	635	1236
10.25	48	54	32	47	1071	885	635	1236
10.50	48	54	32	47	1125	885	635	1236
10.75	48	54	32	47	1214	885	635	1236
11.00	48	54	32	47	1214	885	635	1236
11.25	48	54	32	47	1250	923	635	1236
11.50	48	60	32	47	1250	923	635	1236
11.75	48	67	35	47	1250	923	667	1236
12.00	48	70	35	47	1250	923	698	1236
12.25	50	75	35	47	1250	1038	698	1236
12.50	51	77	35	47	1250	1077	698	1236
12.75	52	79	37	47	1250	1077	698	1236
13.00	52	81	41	47	1250	1077	762	1236
13.25	52	83	43	47	1250	1154	762	1236
13.50	52	87	48	47	1250	1231	762	1236
13.75	52	90	56	47	1286	1308	762	1236
14.00	52	90	59	47	1286	1346	762	1236
14.25	54	100	60	47	1286	1346	762	1236
14.50	59	200	60	47	1286	1346	762	1236
14.75	63	200	60	47	1286	1346	762	1236
15.00	63	200	60	51	1286	1346	762	1236
15.25	64	200	60	56	1286	1346	762	1236
15.50	66	200	60	62	1286	1346	857	1236
15.75	68	200	60	67	1286	1346	873	1236
16.00	68	200	60	69	1286	1346	921	1236
16.25	68	200	60	69	1286	1346	952	1236
16.50	68	200	60	69	1286	1346	1048	1236
16.75	68	200	60	69	1286	1346	1079	1236
17.00	68	200	60	69	1286	1346	1238	1236
17.25	68	200	60	69	1286	1346	1302	1236
17.50	68	200	60	69	1286	1346	1333	1236
17.75	68	200	60	69	1286	1346	1333	1236
18.00	68	200	60	69	1286	1346	1365	1236
18.25	68	200	60	69	1286	1346	1365	1236
18.50	68	200	60	69	1286	1346	1397	1236
18.75	68	200	60	69	1286	1346	1397	1236
19.00	68	200	60	69	1286	1346	1397	1236
19.25	68	200	60	69	1286	1346	1397	1236
19.50	68	200	60	69	1286	1346	1397	1236
19.75	68	200	60	69	1286	1346	1397	1236
20.00	68	200	60	69	1286	1346	1397	1236

Tid	Lengde [%]				Bredde [µm]			
	nr9	nr10	nr11	nr12	nr9	nr10	nr11	nr12
20.25	68	200	60	69	1286	1346	1397	1236
20.50	68	200	60	69	1286	1346	1397	1236
20.75	68	200	60	71	1286	1346	1397	1236
21.00	68	200	60	73	1286	1346	1397	1236
21.25	68	200	60	73	1286	1346	1397	1236
21.50	68	200	60	73	1286	1346	1397	1236
21.75	68	200	60	73	1286	1346	1397	1236
22.00	68	200	60	73	1286	1346	1397	1236
22.25	68	200	60	73	1286	1346	1397	1236
22.50	71	200	60	73	1286	1346	1397	1236
22.75	75	200	60	73	1286	1346	1397	1236
23.00	76	200	60	73	1286	1346	1397	1236
23.25	76	200	60	73	1286	1346	1397	1236
23.50	76	200	60	73	1286	1346	1397	1236
23.75	76	200	60	73	1286	1346	1397	1236
24.00	76	200	60	73	1286	1346	1397	1236
24.25	76	200	60	73	1286	1346	1397	1236
24.50	76	200	60	73	1286	1346	1397	1236
24.75	76	200	60	73	1286	1346	1397	1236
25.00	76	200	60	73	1286	1346	1397	1236
25.25	76	200	60	73	1286	1346	1397	1236
25.50	76	200	60	73	1286	1346	1397	1236
25.75	76	200	60	73	1286	1346	1397	1236
26.00	76	200	60	73	1286	1346	1397	1236
26.25	76	200	60	73	1286	1346	1397	1236
26.50	76	200	60	73	1286	1346	1397	1236
26.75	76	200	60	73	1286	1346	1397	1236
27.00	76	200	60	73	1286	1346	1397	1236
27.25	76	200	60	73	1286	1346	1397	1236
27.50	76	200	62	73	1286	1346	1397	1236
27.75	76	200	63	73	1286	1346	1397	1236
28.00	76	200	64	73	1286	1346	1397	1236
28.25	76	200	65	73	1286	1346	1397	1236
28.50	76	200	65	73	1286	1346	1397	1236
28.75	76	200	65	73	1286	1346	1397	1236
29.00	76	200	65	73	1286	1346	1397	1236
29.25	76	200	65	73	1286	1346	1397	1236
29.50	76	200	65	73	1286	1346	1397	1236
29.75	76	200	65	73	1286	1346	1397	1236
30.00	76	200	67	73	1286	1346	1397	1236
30.25	76	200	70	73	1286	1346	1397	1236
30.50	76	200	71	73	1286	1346	1397	1236
30.75	76	200	73	73	1286	1346	1397	1236
31.00	76	200	73	73	1286	1346	1397	1236
31.25	76	200	73	73	1286	1346	1397	1236
31.50	76	200	73	73	1286	1346	1397	1236
31.75	76	200	73	73	1286	1346	1397	1236
32.00	76	200	73	73	1286	1346	1397	1236
32.25	76	200	78	73	1286	1346	1397	1236
32.50	80	200	78	73	1286	1346	1397	1236
32.75	200	200	78	73	1286	1346	1397	1236
33.00	200	200	78	73	1286	1346	1397	1236
33.25	200	200	78	73	1286	1346	1397	1236
33.50	200	200	78	73	1286	1346	1397	1236
33.75	200	200	78	73	1286	1346	1397	1236
34.00	200	200	79	73	1286	1346	1397	1236
34.25	200	200	83	73	1286	1346	1397	1236
34.50	200	200	87	73	1286	1346	1397	1236
34.75	200	200	90	75	1286	1346	1397	1236
35.00	200	200	200	75	1286	1346	1397	1236
35.25	200	200	200	75	1286	1346	1397	1236
35.50	200	200	200	75	1286	1346	1397	1236
35.75	200	200	200	75	1286	1346	1397	1236
36.00	200	200	200	82	1286	1346	1397	1236
36.25	200	200	200	82	1286	1346	1397	1236
36.50	200	200	200	82	1286	1346	1397	1236
36.75	200	200	200	82	1286	1346	1397	1236
37.00	200	200	200	84	1286	1346	1397	1236
37.25	200	200	200	91	1286	1346	1397	1236
37.50	200	200	200	95	1286	1346	1397	1236
37.75	200	200	200	98	1286	1346	1397	1236
38.00	200	200	200	98	1286	1346	1397	1236
38.25	200	200	200	98	1286	1346	1397	

Tid	Lengde [%]				Bredde [ $\mu$ m]			
	nr9	nr10	nr11	nr12	nr9	nr10	nr11	nr12
40.50	200	200	200	#	1286	1346	1397	1236
40.75	200	200	200	#	1286	1346	1397	1236
41.00	200	200	200	#	1286	1346	1397	1236
41.25	200	200	200	#	1286	1346	1397	1236
41.50	200	200	200	#	1286	1346	1397	1236
41.75	200	200	200	#	1286	1346	1397	1236
42.00	200	200	200	#	1286	1346	1397	1236
42.25	200	200	200	#	1286	1346	1397	1236
42.50	200	200	200	#	1286	1346	1397	1236
42.75	200	200	200	#	1286	1346	1397	1236
43.00	200	200	200	#	1286	1346	1397	1236
43.25	200	200	200	#	1286	1346	1397	1236
43.50	200	200	200	#	1286	1346	1397	1236
43.75	200	200	200	#	1286	1346	1397	1236
44.00	200	200	200	#	1286	1346	1397	1236
44.25	200	200	200	#	1286	1346	1397	1236
44.50	200	200	200	#	1286	1346	1397	1236
44.75	200	200	200	#	1286	1346	1397	1236
45.00	200	200	200	#	1286	1346	1397	1236
45.25	200	200	200	#	1286	1346	1397	1236

Bredde og lengdeutvikling for tørre testobjekter ved 50 bar







## **Datablad**

Dette vedlegget inneholder datablad for silikonet som ble brukt og oljen Midel 7131.

# ELASTOSIL® LR 3003/60 A/B

LIQUID SILICONE RUBBER

## Product description

Liquid silicone rubbers of the ELASTOSIL® LR 3003 series are paste-like, easily-pigmentable two-component compounds with short curing times. Their vulcanizates are noted for their high transparency and excellent mechanical and electrical properties.

## Properties

The products can be used within a temperature range of - 55 °C to + 210 °C.

The addition of heat stabilizers at service temperatures of more than 180 °C is recommended. Further information to improve the heat stability by use of specific ELASTOSIL® FL Color Pastes can be obtained from the Technical Information Sheet "ELASTOSIL® FL Color Pastes".

## Application

These grades are particularly suitable for the economical production of large series of injection-moulded articles.

Parts made from ELASTOSIL® LR 3003/60 A/B can be used for technical applications. These articles are also suitable for use in conjunction with foodstuffs.

Postcured parts can be used for food contact applications and are suitable for use under the Recommendation "XV. Silicones" of the BfR and FDA § 177.2600 under observance of any given limitations on extractable and volatile substances.

## Processing

The A and B components are delivered ready to use in

20 and 200 litre drums. With adequate metering equipment, they can be pumped directly from the original containers into the injection molding machine and mixed by a static mixer. The mixing ratio is 1 : 1. At room temperature, mixtures of A and B components have a pot life of at least three days.

For detailed information refer to our brochure "SOLID AND LIQUID SILICONE RUBBER - MATERIAL AND PROCESSING GUIDELINES".

## Storage

The 'Best use before end' date of each batch is shown on the product label.

Storage beyond the date specified on the label does not necessarily mean that the product is no longer usable. In this case however, the properties required for the intended use must be checked for quality assurance reasons.

## Safety notes

Comprehensive instructions are given in the corresponding Material Safety Data Sheets. They are available on request from WACKER subsidiaries or may be printed via WACKER web site <http://www.wacker.com>.



## Product data

Typical general characteristics	Inspection Method	Value
Hardness Shore A	DIN 53505	60
Appearance		transparent
Density	ISO 1183-1 A	1,13 g/cm <sup>3</sup>
Viscosity (shear rate 0.9 s <sup>-1</sup> )	DIN 53019	1100000 mPa s
Viscosity (shear rate 10 s <sup>-1</sup> )	DIN 53019	420000 mPa s
Tensile strength	DIN 53504 S 1	9,40 N/mm <sup>2</sup>
Elongation at break	DIN 53504 S 1	340 %
Tear strength	ASTM D 624 B	27 N/mm
Rebound resilience	DIN 53512	67 %
Compression set *	DIN ISO 815-B (22 h / 175 °C)	11 %
Dielectric strength (1-mm-sheet)	DIN IEC 243-2	23 kV/mm
Volume resistivity	DIN IEC 93	5 x 10 <sup>15</sup> Ω cm
Dielectric constant at 50 Hz	DIN VDE 0303	2,8 ε <sub>r</sub>
Dissipation Factor (50 Hz)	DIN VDE 0303	20 x 10 <sup>-4</sup> tan δ

Cure conditions: 5 min / 165 °C in press; postcuring for 4 h / 200 °C in ventilated air

\* Postcuring for CS: 6 h / 200 °C

These figures are only intended as a guide and should not be used in preparing specifications.

The data presented in this leaflet are in accordance with the present state of our knowledge, but do not absolve the user from carefully checking all supplies immediately on receipt. We reserve the right to alter product constants within the scope of technical progress or new developments. The recommendations made in this leaflet should be checked by preliminary trials because of conditions during processing over which we have no control, especially where other companies' raw materials are also being used. The recommendations do not absolve the user from the obligation of investigating the possibility of infringement of third parties' rights and, if necessary, clarifying the position. Recommendations for use do not constitute a warranty, either express or implied, of the fitness or suitability of the products for a particular purpose.

The management system has been certified according to DIN EN ISO 9001 and DIN EN ISO 14001

WACKER is a trademark of Wacker Chemie AG.  
ELASTOSIL® is a trademark of Wacker Chemie AG.

For technical, quality, or product safety questions, please contact:

Wacker Chemie AG  
Hanns-Seidel-Platz 4  
81737 München, Germany  
info.silicones@wacker.com

www.wacker.com

## Dielectric Insulating Fluid Overview

December 2010      Page 1 of 2

### MIDEL 7131 Product Overview

MIDEL 7131 is a synthetic ester-based dielectric fluid that has been serving the global transformer market for over 30 years. MIDEL 7131 has been specifically formulated to provide a safe, superior alternative to traditional fluid and dry-type transformers and can be used in indoor or outdoor locations.

MIDEL 7131 is a high performance fluid that offers increased fire safety, greater environmental protection and superior moisture tolerance. Testing has also proven that MIDEL 7131 has excellent dielectric properties.

### IEC 61099 Conformity

MIDEL 7131 conforms to IEC 61099 "Specifications for Unused Synthetic Organic Esters for Electrical Purposes". It is classified as type T1, a halogen-free pentaerythritol ester.

### Areas of Application

MIDEL 7131 filled transformers are available from all major transformer manufacturers. MIDEL 7131 is suitable for a wide range of transformer applications, including sealed and breathing.

- ▶ Distribution transformers
- ▶ Power transformers
- ▶ Traction transformers
- ▶ Rectifier transformers
- ▶ Pole-type transformers
- ▶ Tapchangers
- ▶ Thyristor cooling

### Retrofilling

MIDEL 7131 has been used to retrofill thousands of distribution transformers to improve service life, reduce environmental hazards or increase fire safety.

### Corrosive Sulphur

MIDEL 7131 has been tested by independent laboratories to ASTM D1275 B and IEC 62535, it was found to be non-corrosive.

### Increased Fire Safety

MIDEL 7131 has a high fire point and a low net calorific value (<32 MJ/kg) and is therefore classified as a K3 class liquid.

- ▶ 100% fire safety record
- ▶ High fire point (>300 °C)
- ▶ K-class to IEC 61100 / 61039
- ▶ FM Global® approved transformer fluid
- ▶ Reduced fire safeguarding costs

### Greater Environmental Protection

MIDEL 7131 is an environmentally friendly alternative to conventional transformer fluids because it is classified as readily biodegradable and non-water hazardous.

- ▶ Readily biodegradable (OECD 301)
- ▶ Fully biodegradable (IEC 61039)
- ▶ Classified as non-water hazardous by (UBA)
- ▶ Non-toxic
- ▶ Will not evaporate into the environment
- ▶ Not detrimental to activated sludge in biological treatment plants
- ▶ RoHS compliant

### High Performance

MIDEL 7131 is an extremely robust fluid that delivers long-term stability even when exposed to extreme temperature variations. MIDEL 7131 also has excellent oxygen stability allowing it to be used in breathing transformers.

- ▶ Robust and stable at high temperatures over long periods
- ▶ Suitable for compact transformer design
- ▶ Superior oxygen stability
- ▶ Excellent lubricant
- ▶ No sludge formation

### Moisture Tolerance

MIDEL 7131 is moisture tolerant and can absorb far more water than alternative fluids, without compromising the breakdown voltage.

- ▶ No reduction of breakdown voltage (up to 600ppm / 20 °C)
- ▶ Allows moisture to migrate from cellulose into the fluid
- ▶ Potentially keeps the cellulose drier and slows the rate of ageing
- ▶ Very high saturation limit making condensation virtually impossible
- ▶ Reduced risk of bubble formation

### Delivery

MIDEL 7131 can be delivered in 24.5kg, 195kg or 1000kg sealed containers; bulk tanker deliveries available for >20 tonnes.

### Disposal

For disposal, it is recommended that used MIDEL 7131 or remains of the insulating fluid be burnt in a suitable installation.

## Dielectric Insulating Fluid Overview

December 2010 Page 2 of 2

**Table 1 - Characterisation of Type T1 Transformer Ester According to IEC 61099 and DIN VDE 0375**

	Unit	Test Method	Requirement	MIDEL 7131
<b>Physical Properties According to IEC 61099</b>				
Colour	HU	ISO 2211	max. 200	125
Appearance	-	IEC 61099 7.1.2	clear, free from suspended matter and sediment	clear, free from suspended matter and sediment
Density at 20°C	kg/dm <sup>3</sup>	ISO 3675	max. 1.00	0.97
Kinematic Viscosity at 40°C	mm <sup>2</sup> /s	ISO 3104	max. 35.0	28
Kinematic Viscosity at -20°C	mm <sup>2</sup> /s		max. 3000	1400
Flash Point	°C	ISO 2719	min. 250	260
Fire Point	°C	ISO 2592	min. 300	316
Pour Point	°C	ISO 3016	max. -45	-60
Crystallisation	-	IEC 61099 (2010) Annex A	No crystals	No crystals
<b>Chemical Properties According to IEC 61099</b>				
Water Content	mg/kg	IEC 60814	max. 200	50
Neutralisation Value	mg KOH/g	IEC 62021-2	max. 0.03	<0.03
Oxidation Stability - Total Acid Content - Total Sludge Content	mg KOH/g % mass	IEC 61125	max. 0.3 max. 0.01	0.01 <0.01
Net Calorific Value	MJ/kg	ASTM D 240-02	<32	31.6
<b>Dielectric Properties According to IEC 61099</b>				
Breakdown Voltage	kV	IEC 60156	min. 45	>75
Dielectric Dissipation Factor Tan δ at 90°C and 50 Hz	-	IEC 60247	max. 0.03	<0.008
Volume Resistivity DC at 90°C	Gohm-m	IEC 60247	min. 2	>30

Data quoted above are typical values, may be altered without notice and do not constitute a specification