

Elektrisk trevekst og partielle utladninger i silikongummi for HVAC konnektorer

Innvirking av hydrostatisk trykk og olje

Ingvild Spurkeland

Master i energi og miljø

Innlevert: juni 2016

Hovedveileder: Frank Mauseth, ELKRAFT

Medveileder: Sverre Hvidsten, SINTEF

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Institutt for elkraftteknikk

Problembeskrivelse

Fremtidig olje- og gassproduksjon stiller store krav til subsea-komponenter og for å utvikle de neste generasjons subsea prosesseringsfasiliteter er det et stort behov for pålitelige konnektorer. Dette prosjektet er en del av et fire år langt forskningssamarbeid mellom SINTEF Energi AS og NTNU i samarbeid med flere internasjonale produsenter av konnektorer.

Elektrisk trevekst blir initiert av partielle utladninger og er et forstadium til gjennomslag i isolasjon ved høy spenning. Hovedmålet med denne oppgaven er å studere hvilken innvirkning hydrostatisk trykk vil ha på partielle utladninger og elektrisk trevekst i isolasjonsmaterialet silikon. Effekten av olje som diffunderer inn i silikonmaterialet på partielle utladninger og elektrisk trevekst studeres også.

Forord

Denne oppgaven er en masteroppgave i sivilingeniørstudiet Energi og Miljø med fordypning innen elektrisk energiteknikk ved Norges tekniske- og naturvitenskapelige universitet våren 2016. Oppgaven teller full studiebelastning vårsemesteret og er en del av et fire år langt forskningssamarbeid mellom SINTEF Energi AS, NTNU og en del andre aktører i oljebransjen. Denne oppgaven bygger på prosjektoppgaven Elektrisk trevekst i isolasjonsmaterialet silikon i konnektorer ved høyspent vekselspenningskrevet av undertegnede høsten 2015.

Jeg vil gjerne rette en stor takk til veilederne mine førsteamanuensis Frank Mauseth ved NTNU og seniorforsker Sverre Hvidsten ved SINTEF Energi AS for god hjelp og veiledning under gjennomføring oppgaven. Jeg vil også takke Hans Helmer Sæternes for praktisk hjelp under støping av testobjekter.

Trondheim, Juni 2016



Ingvild Spurkeland

Sammendrag

Konnektoren er en viktig komponent for kraftforsyning av subsea utstyr og er regnet som en av de mest kritiske komponentene. For å sveipe av vann når konnektoren kobles til kan blant annet silikon brukes. Silikonmaterialet blir utsatt for elektrisk feltpåkjenning og dette kan aldre materialet. Temaet for denne oppgaven er partielle utladninger og elektrisk trevekst i silikon. Elektrisk trevekst blir initiert av partielle utladninger og er en av de vanligste årsakene til gjennomslag og påfølgende havari i kabler.

Silikonet i konnektoren vil være omgitt av olje og utsatt for hydrostatisk trykk. Denne oppgaven ser på PD-aktiviteten i et testobjekt med et elektrisk tre på 0,5 mm under forskjellige hydrostatiske trykk. Testobjektene ble testet under hydrostatisk trykk på 1, 10, 20, 40 og 80 bar. Det ble brukt både testobjekter mettet med olje og testobjekter uten olje under testingen for å undersøke hvilken effekt oljen har.

Det ble funnet at tennspenning og slukkespenning økte med økt hydrostatisk trykk. Det ble også funnet at oljemettede testobjekter hadde høyere tennspenning enn testobjekter uten olje. Dette gjaldt uavhengig av påsatt trykk. Med unntak av testobjekter uten olje ved 1 bar ble partielle utladninger initiert samtidig med videre vekst av det elektriske treet. En høyere initieringsspenning førte til raskere trevekst og det elektriske treet vokste følgelig forttere ved høyere trykk.

Abstract

The subsea connector is an important component and also one of the most critical components during subsea power transfer. Silicone rubber can be used to swipe off water when a receptacle is mated into the plug of the subsea connector. The silicone material is subjected to electrical field stress, which can cause ageing of the material. The subject of this master thesis is partial discharges and electrical treeing in silicon rubber. Electrical treeing is initiated by partial discharges and it is one of the most common causes for breakdown of cables.

The silicone rubber in a subsea connector will be enclosed by oil and exposed to a high hydrostatic pressure. This master thesis will focus on PD in a pregrown electrical tree with the length of 0,5 mm when exposed to oil and hydrostatic pressures. The testobjects were tested at a hydrostatic pressure of 1, 10, 20, 40 and 80 bar. Both testobjects saturated with oil and testobjects without oil were used during testing to examine the oil's effect.

The inception voltage and the extinction voltage increased when the hydrostatic pressure was raised. Regardless of the hydrostic pressure did the testobjects saturated with oil have a higher inception voltage than testobjects which had not been saturated with oil. Partial discharges incepted at the same time as the electrical tree grew further, the exception was testobjects without oil during 1 bar pressure. A higher inception voltage resulted in faster tree growth and the electrical tree grew faster when the pressure was raised.

Innhold

1	Innledning	1
1.1	Konnektorer	1
1.2	Definisjoner	3
1.3	Hypoteser	3
2	Teori	5
2.1	Silikon	5
2.2	Diffusjon	6
2.3	Partielle utladninger	7
2.3.1	Elektrisk måling av partielle utladninger	8
2.3.2	Karakteristikk ved partielle utladninger	9
2.4	Elektrisk trevekst	10
2.4.1	Initiering	11
2.4.2	Vekst	12
2.4.3	Gjennomslag	14
2.4.4	Olje og elektrisk trevekst	14

2.4.5	Trykk og elektrisk trevekst	15
2.5	Det elektriske feltet ved nålspissen	15
2.6	Elastisitetsmodul	15
3	Metode	17
3.1	Støping av testobjektene	17
3.2	Nål	19
3.3	Diffusjon	20
3.4	Testoppsett for elektrisk trevekst og måling av partielle utladninger	21
3.4.1	Trykktank	22
3.4.2	Festing av testobjekt og kabelgjennomføring.	23
3.5	Måling av partielle utladninger i et elektrisk tre med lengde 0,5 mm	24
4	Resultater og diskusjon	27
4.1	Oljemetting av testobjektene	27
4.2	Støy i kretsen	29
4.3	Måling av partielle utladninger	31
4.3.1	Påvirkning av trykk	35
4.3.2	Oljens innvirkning på elektrisk trevekst	42
4.3.3	Lengde på trevekst og tennspenning	44
4.4	Feilkilder	44
4.4.1	Bilder av elektrisk trevekst	44
4.4.2	Målinger	45

4.4.3	Kalibrering av spenning i kretsen	45
5	Konklusjon	47
6	Videre arbeid	49
	Referanser	51
	Tillegg	55
A		55
B		56
C		58
D		60

Kapittel 1

Innledning

1.1 Konnektorer

Sjøkabler brukes til å overføre kraft mellom to land med havstrek mellom, for eksempel fra en offshore vindmøllepark til land eller mellom en plattform og land. For å koble sammen kablene med blant annet pumper, motorer og brytere, brukes konnektorer. Konnektorer kan også brukes til å koble sammen offshore-komponenter. Tidligere ble slikt utstyr gjerne plassert på plattformer, men i dag blir mer og mer utstyr plassert på havbunnen [1] [2]. For at kraftoverføring i sjøkabler skal være sikker er det derfor viktig at konnektorene er pålitelige.

Det deles opp i tre forskjellige typer konnektorer:

- **Penetrator**

Dette er egentlig ikke en konnektor, men en endeslutning hvor det er mulig å mate høyspentkabler gjennom en vegg i utsyret [2].

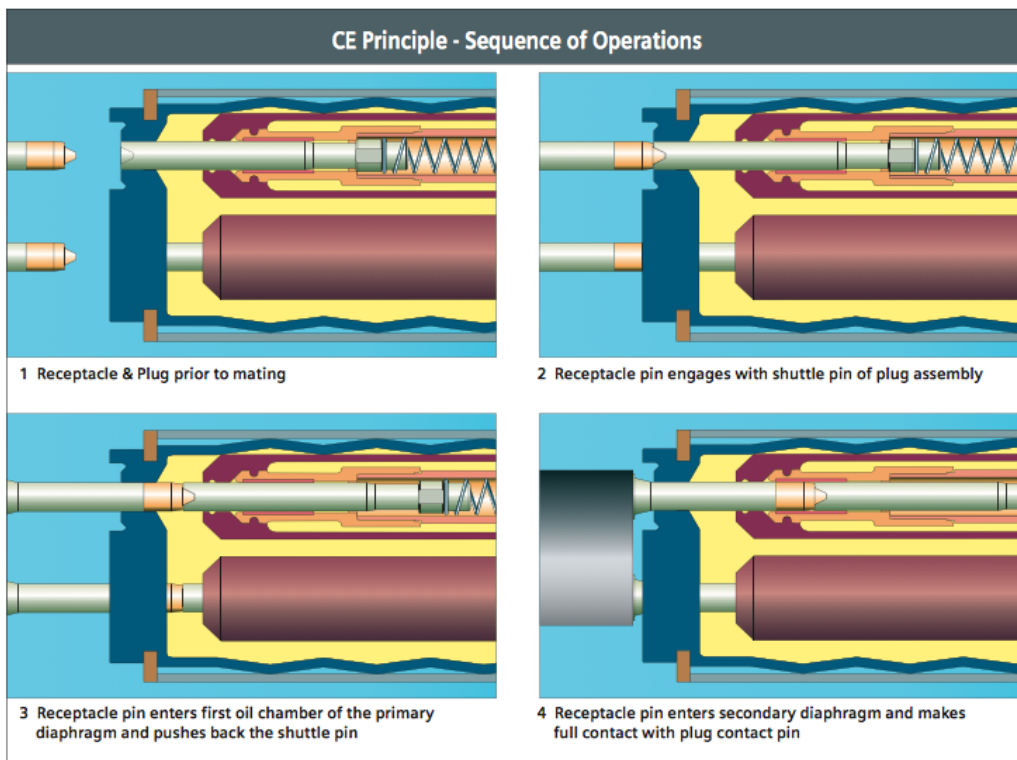
- **Tørre konnektorer**

Tørre konnektorer kjennetegnes ved høy pålitelighet, men utstyr må kobles sammen på land eller en flåte før det senkes ned på havbunnen [1].

- **Våte konnektorer**

En våt konnektor kan kobles til og fra under vann. Som oftest vil isolerende olje brukes for å absorbere vann [1].

Figur 1.1.1 viser en SpecTRON-konnektor fra Siemens [3]. Det er viktig å unngå vann i konnektoren, da det svekker de elektriske egenskapene [4]. Konnektoren er derfor designet for å dra av mest mulig vann. Kontakten vil bli ført gjennom to oljekammere, det ene inni det andre. Kontakten, merket receptacle på figur 1.1.1, entrer det første oljekammeret. Så føres kontakten forbi membranen, som kan bestå av silikon, og inn i det andre oljekammeret. Oljen brukes til å absorbere vann, mens silikon brukes på membranen for å sveipe av vann fra kontakten [4].



Figur 1.1.1: Prinsippet for hvordan en konnektor opererer. [3]

Per 100 meter dybde øker trykket med ca 10 bar. Det hydrostatiske trykket på en konnektor ved for eksempel 400 meters dybde vil være 40 bar. Konnektorene utset-

tes for et høyt trykk og det er derfor viktig å vite hvordan isolasjonsmaterialene i en konektor oppfører seg under trykk. Denne oppgaven omhandler isolasjonsmaterialet silikon og følgelig er det silikon som blir betraktet under trykk. Fra figur 1.1.1 kan det sees at membranen ligger i olje. Silikon er et polymer og olje vil da diffundere inn [5]. Silikonet vil altså settes under trykk samt at det vil mettes med olje. Det vil være viktig å studere hva både olje og trykk gjør med isolasjonsmaterialet. Oppbygning av og mekaniske egenskaper silikon innehar vil bli beskrevet nærmere i delkapittel 2.1.

1.2 Definisjoner

Dette delkapittelet forklarer og definerer uttrykk som blir brukt i oppgaven.

- Alle spenninger i oppgaven er oppgitt i RMS-verdi .
- To forskjellige uttrykk for testobjektene vil bli benyttet: Tørre testobjekter og oljemettede testobjekter. Tørre testobjekter er i denne oppgaven definert som testobjekter laget ved romtemperatur og som ikke blir utsatt for noen andre forurensninger. Oljemettede testobjekter er definert som testobjekter som er lagt i den estherbaserte væsken Midel RT7131 til testobjektene er mettet. Midel RT7131 representerer i denne oppgaven den isolerende oljen som ligger rundt silikonet.
- Atmosfærisk trykk vil i denne oppgaven være rundet av til 1 bar.

1.3 Hypoteser

Denne oppgaven er en del av et fire år langt prosjekt og det er tidligere skrevet to prosjektoppgaver og en masteroppgave innen prosjektet. Hypotesene i denne oppgaven er følgelig hentet fra konklusjonen til tidligere oppgaver.

Basert på de nevnte tidligere oppgavene, er følgende hypoteser for denne oppgaven:

1. Tennspenningen øker dersom trykket som blir påført testobjektet øker.
2. Slukkespenningen øker dersom trykket som blir påført testobjektet øker.
3. Partielle utladninger forekommer ved lik spenning i oljemettede testobjekter som ved tørre testobjekter. Dette gjelder uansett hvilket trykk som er påført testobjektene.

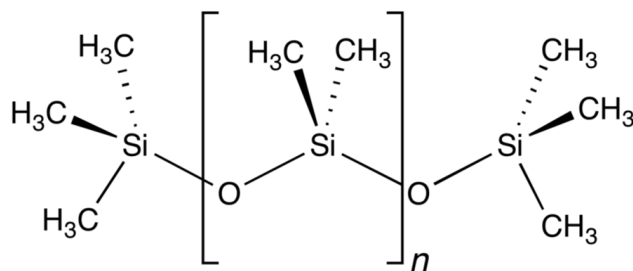
Det er knyttet usikkerhet til om oljemettede testobjekter laget av silikon fører til at trevekst blir initiert ved høyere spenning enn ved tørre testobjekter laget av silikon. Rune Gravaune [4] gjorde funn som tydet på høyere spenning, men prosjektoppgaven denne oppgaven bygger på [6] observerte ingen signifikant forskjell på oljemettede og tørre testobjekter.

Kapittel 2

Teori

2.1 Silikon

Det finnes flere typer silikon, men den vanligste silikontypen brukt i industrien består av polydimethylsiloxane (PDMS) [7]. Figur 2.1.1 viser den kjemiske strukturen til PDMS. Silikon skiller seg fra andre polymerer ved at det består av SiO-bindinger som kjerne i stedet for karbonbindinger [8]. De viktigste egenskapene til dette materialet vil bli presentert i dette delkapittelet.



Figur 2.1.1: Polydimethylsiloxane (PDMS) [7]

Herding av silikon godt egnet for forsegling og innkapsling, foregår ved at Si-O-Si kryssbindes. Denne type silikon kalles RTV (Room Temperature Vulcanization) silikon [9]. Selv om RTV herdes ved romtemperatur, vil herdingen foregå fortere

ved høyere temperaturer [10].

Molekylene i PDMS består hovedsakelig av metylgrupper, silikon og oksygen [11], som vist i figur 2.1.1. Siloxanebindingene (Si-O-Si) har en høyere bindingsenergi enn karbonbindinger (C-C), 433 kJ/mol mot 355 kJ/mol. Derfor vil PDMS ha en bedre kjemisk stabilitet sammenlignet med andre polymerer og følgelig motstå kjemiske interaksjoner [12]. PDMS-kjedene er karakterisert av stor grad av fleksibilitet. Det vil si at kjedene beveger seg innad i silikonet [8]. Fleksibiliteten har en sterk korrelasjon med at de hydrokarbonske metylgruppene er hydrofobe og silikon er derfor vannavstøtende [11].

Silikon er kjent for god termisk stabilitet og har bedre temperaturegenskaper enn blant annet epoxy og PEX [13]. Silikon er et mykt materiale i den forstand at det vil gi noe etter dersom det påføres trykk [12]. I tillegg har det gode elektrisk isolerende egenskaper og har derfor i de senere år blitt brukt mer og mer i skjøter i kraftoverføringskabler [13].

2.2 Diffusjon

Det er fritt volum mellom polymerkjeder og dermed vil diffusjon foregå når polymer senkes ned i en væske [5]. For å måle opptaket av olje er det mulig å bruke "mass-uptake". Denne metoden består av at massen til et testobjekt veies før det nedsenkes i væske. Deretter veies objektet etter en vilkårlig tid t . Vektøkningen vil være væsken som har diffundert inn i testobjektet. Når vekten ikke endrer seg lenger vil testobjektet ha nådd metning [14].

Polymer kan eksistere i to forskjellige tilstander. Én ved lav temperatur og én ved høy temperatur. Ved lav temperatur vil polymerkjedene være relativt ubøyelige og stive og det vil være vanskelig for molekyler å trenge inn. Ved høy temperatur vil det være fleksibilitet i polymer og det er dermed mye plass for molekyler til å

bevege seg rundt og trenge seg inn. Basert på dette vil diffusjon foregå fortere i silikon dersom væsken som diffunderer inn har en høyere temperatur [5]. Delkapittel 2.1 beskrev at silikon har en høy grad av fleksibilitet. Selv om dette er med på å gjøre silikon vannavstøtende vil fleksibiliteten føre til at væske vil diffundere fortere inn i silikon enn for eksempel PEX [15].

Når væske diffunderer inn i et testobjekt bestående av polymer, vil objektet bli noe større. Dette tyder på at det skapes hull i polymeret og det er mulig at disse hullene fører til en svekkelse av materialet [5]. Tilsvarende funn er også gjort for silikon: Dersom væske diffunderer inn i silikon, vil silikonet bli mykere, større og selve stryken til silikonet vil bli redusert [12].

Det ble ikke funnet litteratur om oljediffusjon i silikon og heller ikke i polymer sett ut fra et elektrisk perspektiv. Det ble derfor brukt en artikkel [16] om diffusjon av olivenolje inn i emballasje bestående av polyetylen for å se på oljediffusjon. Dersom polymeret er tykt, vil det ta lang tid før det er mettet med olje. En økning i tykkelse med faktor n , vil øke tiden til metning med en faktor på n^2 . Olivenolje har en konstant diffusjonskonstant. Dette viser at olivenolje i liten grad endrer oppbygningen til polymer [16].

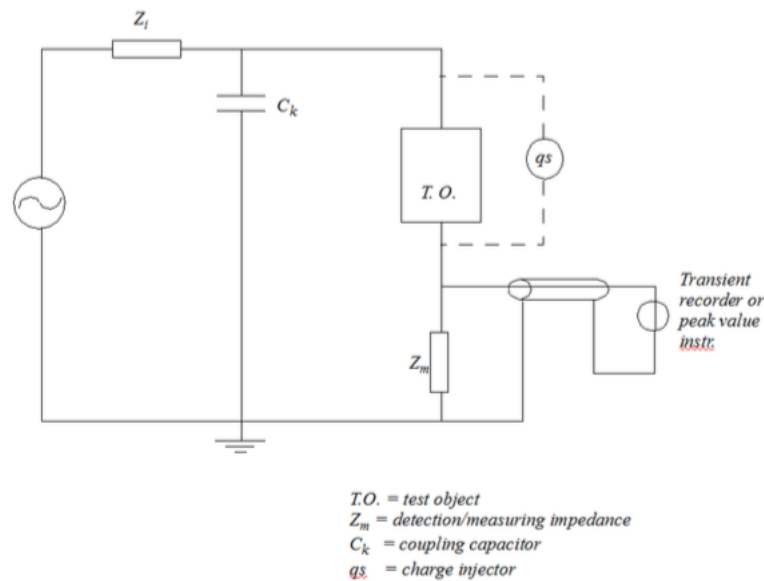
2.3 Partielle utladninger

Partielle utladninger, PD, er lokale dielektriske sammenbrudd i en liten del av et isolasjonsmateriale som kun varer i noen nanosekunder. PD vil oppstå ved lokalt forsterkede felt i et isolasjonsmateriale. Eksempler på hvor det vil opptå forsterkede felt er ved gass- eller væskefylte hulrom, spisser, grenseoverflater og ledende partikler. De forsterkede elektriske feltene vil føre til dannelse av hulrom hvor PD vil foregå. Repetitiv PD vil kunne forårsake varige fysiske og kjemiske forringelser av et isolasjonsmateriale [9]. Forringingen forekommer ved repetitive overslag i hulrommet, noe som forårsaker en svekkelse av veggene til hulrommet [17]. Forskjellige isolasjonsmaterialer har forskjellige mekaniske egenskaper og ødleggelse

av et isolasjonsmateriale vil følgelig forekomme etter forskjellig tid. De mekaniske egenskapene til et isolasjonsmateriale er derfor viktige i forhold til når PD blir initiert [18].

2.3.1 Elektrisk måling av partielle utladninger

Hvordan PD kan måles elektrisk i et laboratorium, er vist i figur 2.3.1.



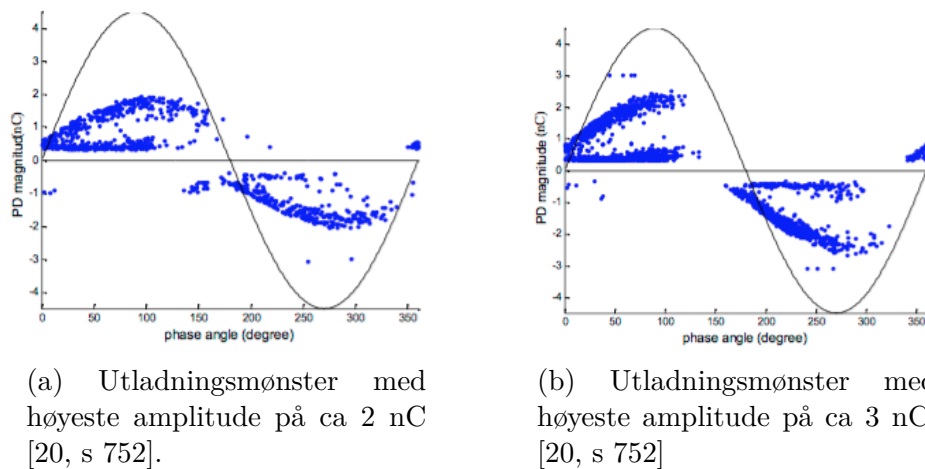
Figur 2.3.1: Forenklet krets for elektrisk måling av partielle utladninger [9, s. 231].

Den faktiske utladningen som oppstår i kretsen kan ikke måles direkte, derfor måles en tilsynelatende ladning. Den tilsynelatende ladningen er ladningen koblingskondensatoren tilfører kretsen for å kompensere for det plutselige spenningsfallet over testobjektet forårsaket av den partielle utladningen [9] [18]. I figur 2.3.1 er dette ekvivalent med at en impulsstrøm med ladning q_s injiseres over testobjektets terminaler. Denne ladningen fører til et spenningsfall over Z_m . Dette vil opphøre når når spenningen over C_k er den samme som over testobjektet.

2.3.2 Karakteristikk ved partielle utladninger

Ved elektrisk måling av PD vil forskjellige utladningstyper ha forskjellige karakteristikk. Dette betyr at de forkommer på forskjellige steder langs sinuskurven. Det er vanlig å måle og analysere PD-målinger ut ifra et $\Phi - q - n$ -diagram. Disse diagrammene er basert på opptak av PD (målt i pC) mot fasevinkel (0-360°) og hvor PD oppstår i løpet av en spenningscyklus. Dersom utladningene øker i q -verdi med økt spenning, tyder det på at utladninger i større hulrom starter [19].

Karakteristikken som skal undersøkes nærmere, er utladninger som følge av hulrom. Dette er fordi utladninger i et elektrisk tre kan anses å være hulromsutladninger, se delkapittel 2.4. Hulromsutladninger vil typisk ha positive pulser konsentrert rundt den positivt stigende delen av sinuskurven og negative pulser rundt den negativt synkende delen av sinuskurven [19].



Figur 2.3.2: Typiske utladningsmønstre for PD i hulrom. I figur 2.3.2a er spenningen høyere enn i figur 2.3.2b. [20, s 752]

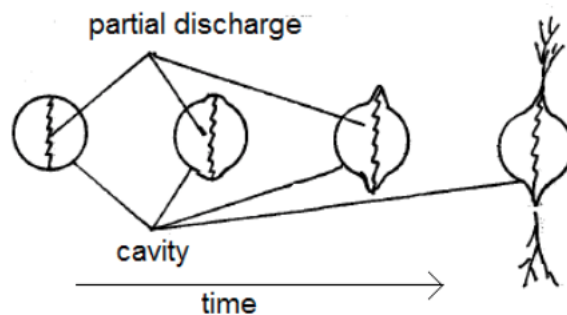
En høyere påtrykt spenning vil føre til utladninger med høyere amplitude i $\Phi - q - n$ -diagrammet [20]. Dette kan også sees fra figur 2.3.2 der figur 2.3.2b har en høyere spenning og en høyere amplitude på utladningene enn figur 2.3.2a. Fra eksperimenter utført i epoxy, ble PD detektert før elektrisk trevekst startet og

lenger trevekst førte til større utladninger [19].

2.4 Elektrisk trevekst

Elektrisk trevekst er en av hovedårsakene til elektrisk gjennomslag i, og havari av kabler [13]. Det er derfor viktig å forstå hva elektrisk trevekst er og hvordan det oppstår.

Elektrisk trevekst er en svekkelse av et fast isolasjonsmateriale og et forstadie til gjennomslag. Treveksten blir initiert av partielle utladninger [21] og dermed følger det at elektrisk trevekst oppstår fordi det elektriske feltet er høyere i en liten del av isolasjonsmaterialet, se delkapittel 2.3. Figur 2.4.1 illustrerer hvordan partielle utladninger deformerer et hulrom og elektrisk trevekst oppstår.

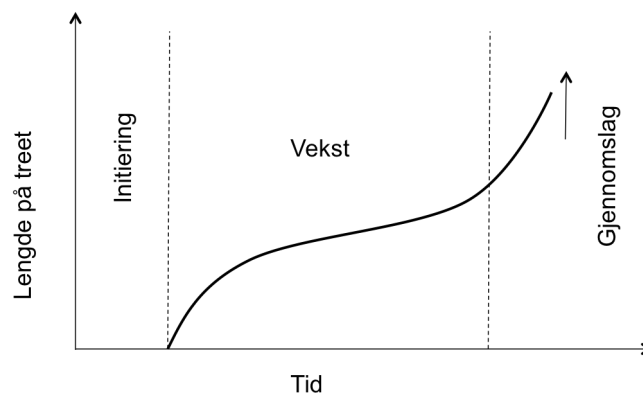


Figur 2.4.1: PD deformerer et hulrom og skaper trevekst [9, s. 224].

Elektrisk trevekst består av flere sammenhengende hule kanaler som til sammen danner en trelignende form. De hule kanalene vil i PE og PEX bestå av avfallsmaterialene acetylene, CO_2 , H_2 og CO [17]. Det at kanalene til et elektrisk tre som vokser i PE- og PEX-isolasjon innehar mye karbon fører til en ledende karbonisert gren [22]. Som nevnt i delkapittel 2.1 består silikon av SiO-kjeder. På grunn av denne kjemiske sammensetningen, vil færre karboner bli satt fri under elektrisk trevekst [10]. Følgelig vil elektriske trær i silikon være lite ledende eller

ikke-ledende og det er derfor forventet at trevekst vil foregå saktere sammenlignet med PE og PEX [22], [23].

Elektrisk trevekst er et stokastisk fenomen og det er vilkårlig hvor nye kanaler oppstår [18]. Det er derfor vanskelig å beskrive elektrisk trevekst ved hjelp av matematiske modeller og det er heller vanlig å dele treveksten inn i tre forskjellige faser. Dette gjelder også for trevekst i silikon [24]. De forskjellige fasene vil bli beskrevet ut fra figur 2.4.2.



Figur 2.4.2: De forskjellige fasene ved elektrisk trevekst, teoretisk forløp.

2.4.1 Initiering

Initieringsfasen beskrives av initieringstiden, definert som tiden det tar før et elektrisk tre er synlig når isolasjonen er utsatt for konstant spenning. Initieringstiden er svært avhengig av den elektriske feltstyrken, noe som betyr at jo sterkere feltet er desto raskere vil det elektriske treet bli synlig. Initieringstiden er omvendt proporsjonal med frekvesen ved AC spenning [17].

Det eksisterer flere teorier om hvordan elektrisk trevekst blir initiert. De tidligste teoriene om elektrisk trevekst så på initieringen som en lokal svekkelsesprosess som oppstod på grunn av det høyere E-felt rundt nålelektroden. Det ble foreslått at

Maxwellkrefter skapte sprekker i isolasjonen rundt nålen og at trevekst deretter ble initiert [17], men det er i i ettertid funnet at Maxwellkrefter alene ikke kan være skyld i at elektrisk trevekst initieres [25]. En annen teori er at elektrisk trevekst blir initiert ved at små mikrofraksjoner i isolasjonen oppstår [17]. Disse mikrofraksjonene vil inneholde sykliske romladningsinjeksjoner som fører til elektronskred og svekkelse av isolasjonsmaterialet [17] [26].

Det er også mulig at initiering av trevekst under AC-spenning er resultatet av repetitive prosesser [17]. Ved AC-spenning vil det foregå en svekkelse av isolasjonsmaterialet minst én gang per periode. Svekkelsen av isolasjonsmaterialet vil foregå ved [9]:

- Temperaturøkning og kjemiske reaksjoner i omkringliggende materialer på grunn av utladninger.
- Elektronskred i feltets retning fordi isolasjonen blir bombardert av ioner og elektroner rundt utladningsområdet.
- Stråling fra utladningene. Ultrafiolett stråling har såpass mye energi at bindinger i organiske materialer vil brytes.

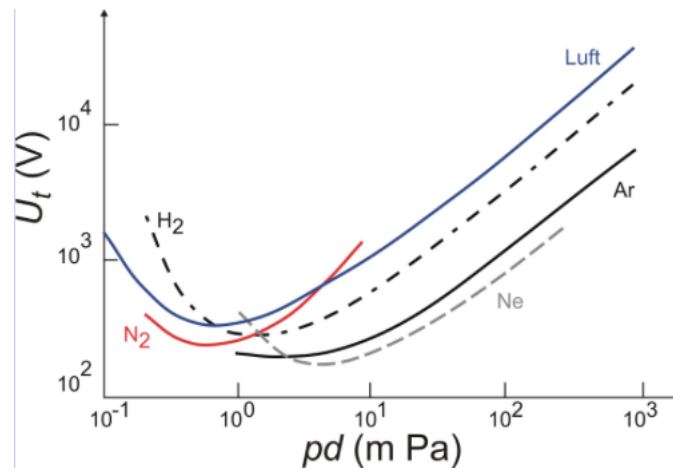
2.4.2 Vekst

Dersom elektrisk trevekst har oppstått vil kanalene utvikles og vokse på grunn av hulromsutladninger i gass [9]. Holdfastheten til gassen vil være mindre enn i polymeret rundt, noe som fører til at isolasjonen rundt hulrommet bryter sammen og mer gass dannes. Følgelig vil PD over tid kunne utvide kanalene [9] [18]. Gjennom vekstfasen vil det elektriske feltet i kanalene være i konstant endring, noe som fører til at PD-aktiviteten er forskjellig i kanalene i et elektrisk tre [27].

Vekstfasen kan deles i to: rask vekst og stagnasjon. Først vil treet vokse raskt for deretter å stagnere en periode. Strukturen og veksthastigheten til et elektrisk tre vil avhenge av påtrykt spenning. En høyere påført spenning vil føre til at det

elektriske treet vokser forttere. Dette gjelder både for elektriske trær i silikon og i PEX [22]. Under vekstfasen vil flere grener oppstå i det elektriske treet [22] [28]. Ved trevekst i silikon vil treet vokse fort rett etter initiering, men den dårlige ledningsevnen til kanalene, se delkapittel 2.1, kan ha stor betydning for stagnasjon av det elektriske treet. Det er dermed mulig at stagnasjonsfasen varer lenger enn i PE og PEX [22].

Spaltingen av fast materiale til gasser vil ha mye å si for veksten av det elektriske treet. Dette er fordi de forskjellige gassene vil ha forskjellig holdfasthet og PD vil dermed være avhengig av gassene [26]. Paschens lov forteller at holdfastheten er en funksjon av produktet mellom gasstrykket og avstanden mellom elektrodene. Initie-tell gjennomslagsoppførsel av en gass i et hulrom i et polymer har vist seg å følge Paschen lov tett [17]. Ved PD vil holdfastheten dermed avhenge av gasstrykket og størrelsen til hulrommet. Under er Paschenkurven, som er en grafisk fremstilling av Paschens lov, presentert. Paschenkurven gjelder for én gitt temperatur [9].



Figur 2.4.3: Paschenkurve for hydrogen, luft, nitrogen, argon og neon [29]

2.4.3 Gjennomslag

Den siste fasen av treveksten kalles gjennomslag. Den kjennetegnes av rask vekst før det blir fullstendig kontakt mellom to elektroder [28].

Like før gjennomslaget forekommer, vil tuppen av de lengste kanalene i treet være tynne, typisk i størrelsesorden $2-3 \mu m$, og uten noe særlig sidegrener [17]. I det gjennomslag forekommer, kjennetegnes kanalen av en høy strøm og forkulling, noe som fører til at kanalen bli mange ganger større [4].

Gjennomslag kan forekomme med det samme kanalen får kontakt med jordelektroden, men det kan også ta noe tid før gjennomslag skjer. I silikon er det vanligst at gjennomslag forekommer så fort en av kanalene til treet når jordelektroden [17].

2.4.4 Olje og elektrisk trevekst

Det ble ikke funnet noen konkret informasjon om hvordan silikon mettet med olje ville påvirket den elektriske treveksten. I masteroppgaven skrevet av Rune Gravaune [4] ble det gjort funn som tyder på at oljemettet silikon fører til økt gjennomslagsspenning, mens det i prosjektoppgaven denne masteroppgaven bygger på [6] ble gjort funn som peker mot at oljemettet silikon ikke har noen særlig høyere gjennomslagsspenning enn tørr silikon.

Vann som trenger inn i et hulrom fører til at initiell spenning for PD i hulrom minker. Fuktighet fører til økt slukkspenning, men også tidlige treformasjoner [21]. Da vann og olje innehar forskjellige dielektriske egenskaper, vil det være høyst usikkert om de nevnte fenomenene også gjelder for olje.

2.4.5 Trykk og elektrisk trevekst

Ved økt hydrostatisk trykk vil elektrisk trevekst i silikon bli initiert senere enn ved atmosfærisk trykk. Dersom trevekst har blitt initiert, vil gjennomslag forekomme innen et kortere tidsintervall ved høyere trykk [21]. Siden silikon er et mykt materiale vil hulrom som eksisterer bli komprimert dersom trykket øker og følgelig vil det indre trykket også øke [21]. Hulrom som blir komprimert kan være en forklaring på hvorfor elektrisk trevekst blir initiert senere ved høyere trykk.

2.5 Det elektriske feltet ved nålspissen

Initiering av et elektrisk tre vil være avhengig av det elektriske feltet, se delkapittel 2.4. Bakgrunnsfeltet ved tuppen av nålspissen i et oppsett med nål-plate kan regnes ut ved hjelp av følgende formel [21] :

$$E_{tip} = \frac{2V}{a \cdot \ln(4d/a)} \quad (2.5.1)$$

hvor:

V = Påført spenning

d = Avstanden mellom nålspissen og jord

a = Radiusen til nålspissen

Bakgrunnsfeltet tar ikke hensyn til romladninger [21] og følgelig er dette kun en indikasjon på hva det elektriske feltet er.

2.6 Elastisitetsmodul

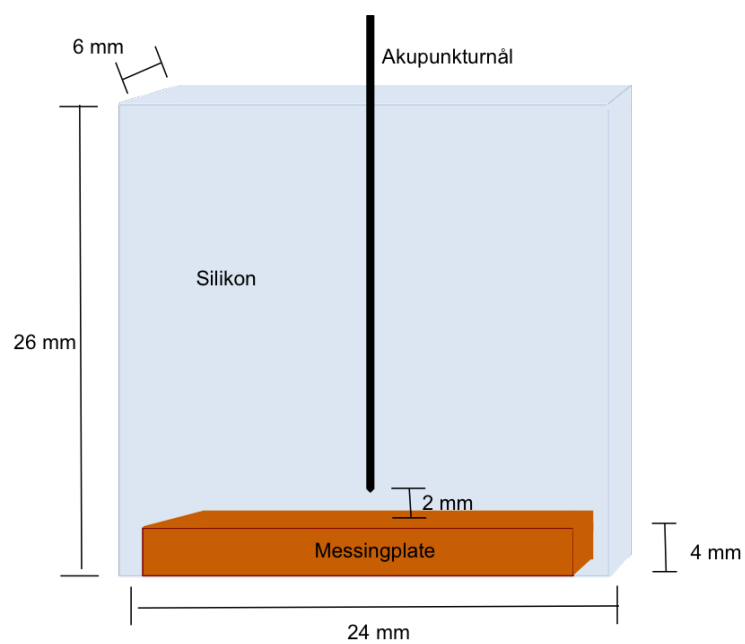
Elastisitetsmodulen (E-modulen), også kjent som Youngs modul er en mekanisk egenskap til lineære elastiske materialer. Den defineres som forholdet mellom fasthet og forlengelse [30].

Trevekst er avhengig av hvilke mekaniske egenskaper et materiale innehar [31]. Trevekst i elastiske materialer utvikles saktere i forhold til uelastiske materialer. Følgelig vil E-modulen til et materiale kunne være et mål på hvor resistent materialet er mot trevekst. Et materiale med lavere E-modul vil ha mindre grad av indre mekaniske spenninger [31].

Kapittel 3

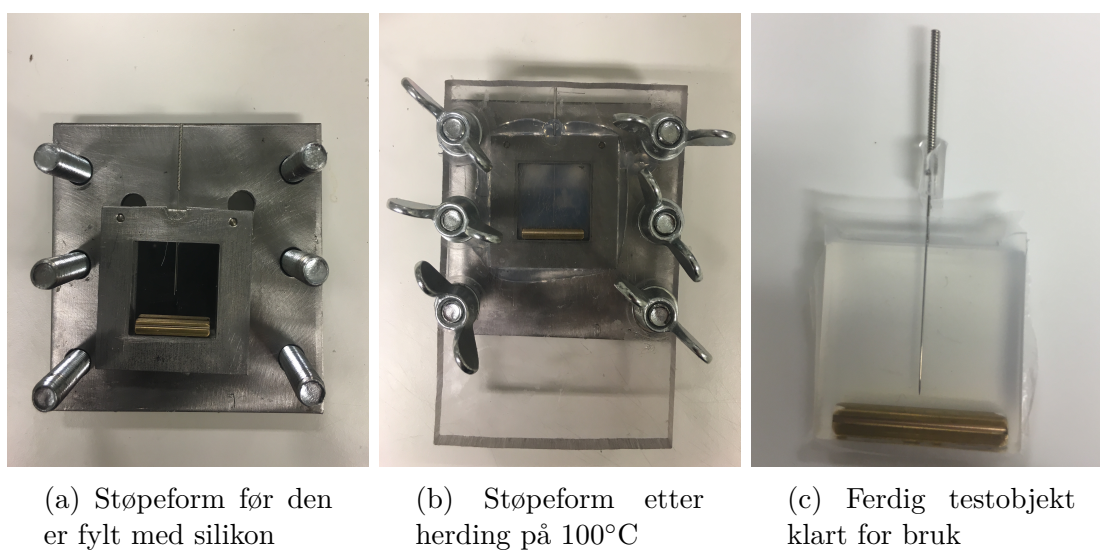
Metode

3.1 Støping av testobjektene



Figur 3.1.1: Figur av et testobjekt med respektive mål.

For å støpe silikon tilpasset testoppsettet, måtte silikonet blandes. Silikonmaterialet Elastosil LR 3003/60 A og Elastosil LR 3003/60 B ble blandet i et 1:1-forhold. Deretter ble blandingen satt i et vakumskap samtidig med at det ble rørt i blandingen i én time. Vakumskapet ble brukt for at alle luftbobler skulle bli drevet ut av silikonet. Blandingen ble så tatt ut og ført over i 100 ml sprøyter. Det ble dannet luftbobler under overføringen og for at disse skulle sive ut, ble sprøytene plassert i et kjøleskap over natten. Blandingen ble plassert kjølig for å forsinke herdeprosessen til silikonet. Silikon herdes fortere ved høyere temperaturer, se delkapittel 2.1.



Figur 3.1.2: Støping av et testobjekt

Når silikonet var fri for luftbobler ble en form med mål 26x24x6 mm lagt på en stålplate. Formen ble tørket av med isopropanol for å unngå urenheter. Jordelektroden, en messingplate med lengde 22 mm og bredde og tykkelse på 4 mm, ble så skrudd fast i bunnen av formen. Silikonet ble sprøytet inn og deretter ble et plexiglass skrudd fast i stålplaten for å presse silikonet ut i formen. En nål ble ført inn i silikonet. Ønsket avstand mellom nål og jordelektrode var $2 \pm 0,2$ mm, dette ble målt i et mikroskop. Formen ble plassert i en varmeovn på 100°C i én time. Deretter ble formen fjernet og silikonet med nål og messingplate ble plassert i en varmeovn i 4 timer på 200°C for herding. Støpeprosessen vises i figur 3.1.2.

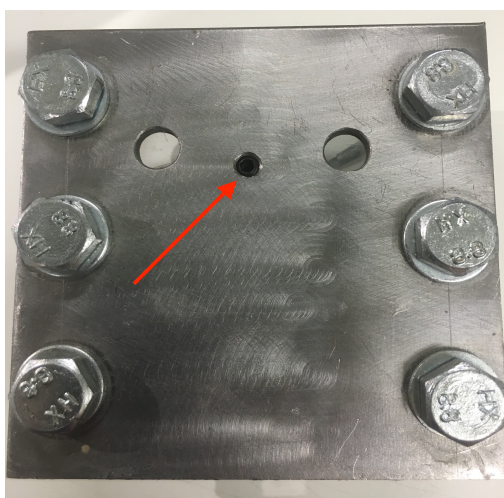
3.2 Nål

Det ble brukt akupunktur nåler for å etterligne en ujevnheter i isolasjonsmaterialet. Spissen av alle nålene som ble brukt i testobjektene ble studert i mikroskop både før og etter herding. Dette for å være sikker på at det ikke var ujevnheter ved spissen eller at den var deformert. Figur 3.2.1 viser et bildet av spissen til en nål uten deformerings eller ujevnheter. Det elektriske bakgrunnsfeltet som en funksjon av radius til nålspisser finnes i tillegg D

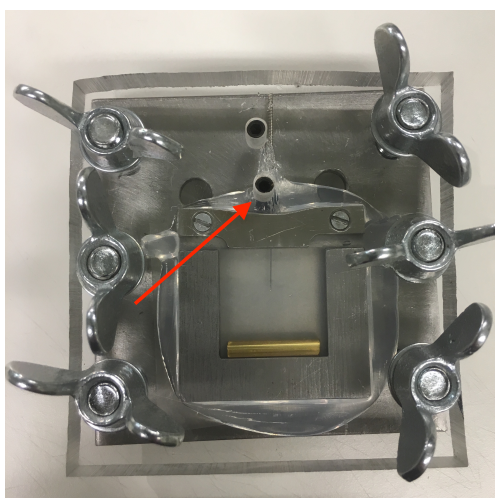


Figur 3.2.1: 500x forstørret bilde av nål.

Under prosjektoppgaven denne masteroppgaven bygger på [6], var det et omfattende problem at nålen skled vertikalt i støpeformen under herding av silikonet, noe som skyldtes at det ikke var nok friksjon på siden av nålen til å holde den fast. Avstanden mellom messingplaten og nålen ble dermed for stor på mange av testobjektene. Det ble under arbeid med denne oppgaven derfor lagt inn settskruer i støpeformene for å forsøke å feste nålen. Se figur 3.2.2. Dette førte til en noe mindre feilrate, men det ble fortsatt observert at avstanden mellom nål og jordelektrode ble for stor etter herding på tross av at avstanden var målt på forhånd. Dette kan skyldes at nålen ble dratt noe vertikalt oppover under stramming av settskruene. Det kan også hende at settskruene ikke klarte å holde igjen nålen og at den fortsatt skled noe vertikalt i formen under herding.



(a) Undersiden av støpeformen med settskrue. Settskruen er markert med pil



(b) Oversiden av støpeformen med settskrue. Settskruene er markert med pil

Figur 3.2.2: Settskruer i støpeformene. Settskruen i 3.2.2b som ikke er markert med pil var satt inn feil.

3.3 Diffusjon

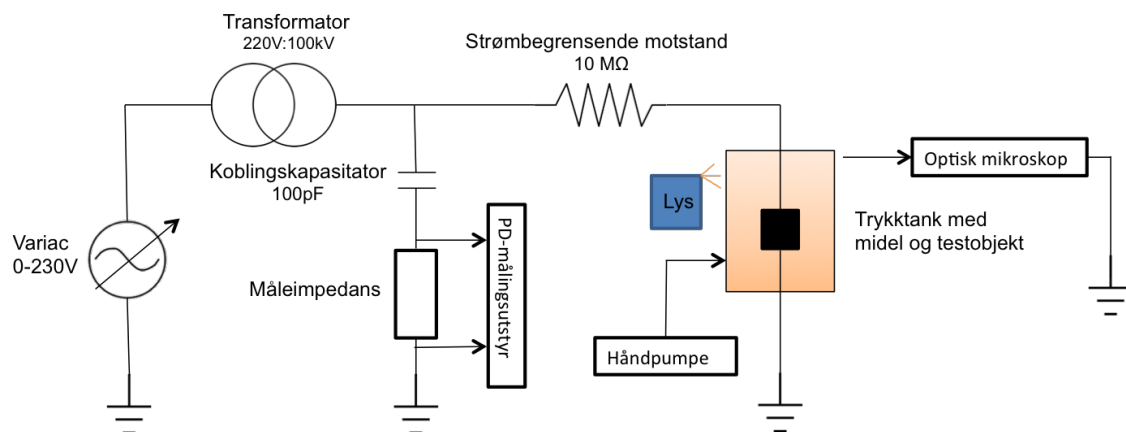
For å mette testobjektene med olje var det nødvendig å beregne hvor lenge de respektive objektene måtte ligge nedsenket i olje. Verdier fra Rune Gravaune [4] sin oppgave ble benyttet for å vite hvor lang tid det tok før et testobjekt var oljemettet. Testobjektene i denne oppgaven er støpt i samme form som Rune Gavaune brukte. Testobjektene ble nedsenket i olje ved $60^{\circ}C$ i 10 dager før de lå i olje ved en romtemperatur på $20^{\circ}C$ i 13 dager [4].

3.4 Testoppsett for elektrisk trevekst og måling av partielle utladninger

I cellen som ble brukt til testing var det plassert:

- en variac for å kunne variere påtrykt spenning
- en transformator for å transformere opp spenningen
- en kondensator som ble brukt som koblingskondensator ved PD-målinger
- PD-målingsutstyr med tilhørende PC
- en strømbegrensende motstand for å beskytte utstyr bak motstanden ved gjennomslag
- en trykktank
- et mikroskop
- en ekstern lyskilde
- håndpumpe for å trykke opp tanken

Kretsen for testoppsettet med relevante opplysninger er vist i figur 3.4.1.

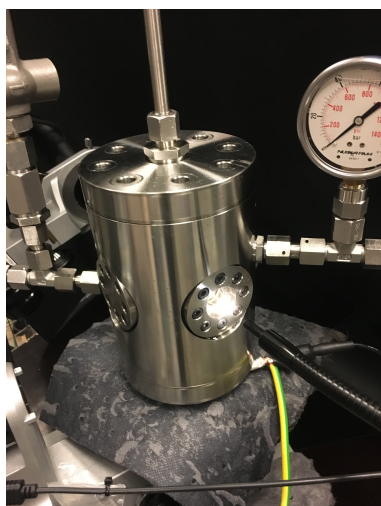


Figur 3.4.1: Testoppsett for måling av partielle utladninger og elektrisk trevekst under trykk

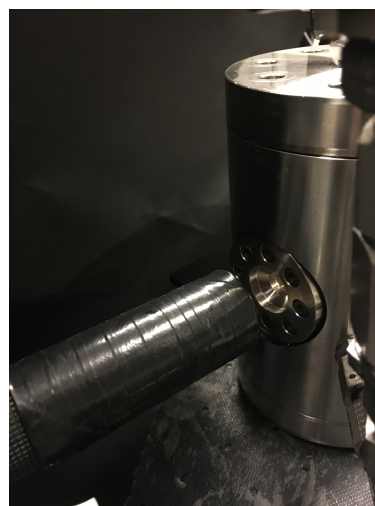
OMICRON-systemet med MPD 600 ble brukt for å måle PD. For å kalibrere spenningen på OMICRON-systemet, ble en probe koblet til mellom den strømbe-grensende motstanden og trykktanken. Proben var igjen koblet til et multimeter slik at spenningen kunne måles.

3.4.1 Trykktank

Trykktanken hadde i utgangspunktet fire vinduer, hvorav to var tettet. Objektivet til et Keyence VHX-600-mikroskop ble plassert ved ett av vinduene, objektivet hadde 40x forstørrelse og ble plassert 4-5 cm fra vinduet for å få skarpe bilder. I tillegg ble et svart rør satt utenpå objektet som strakte seg helt inntil vinduet for å skjerme for lys fra sidene. Ved det andre vinduet til trykktanken ble en ekstern lyskilde plassert. En ekstern lyskilde ble valgt for å få bedre skyggeeffekter.



(a) Trykktank med vindu mot ekstern lyskilde.



(b) Trykktank med vindu mot objektivet.

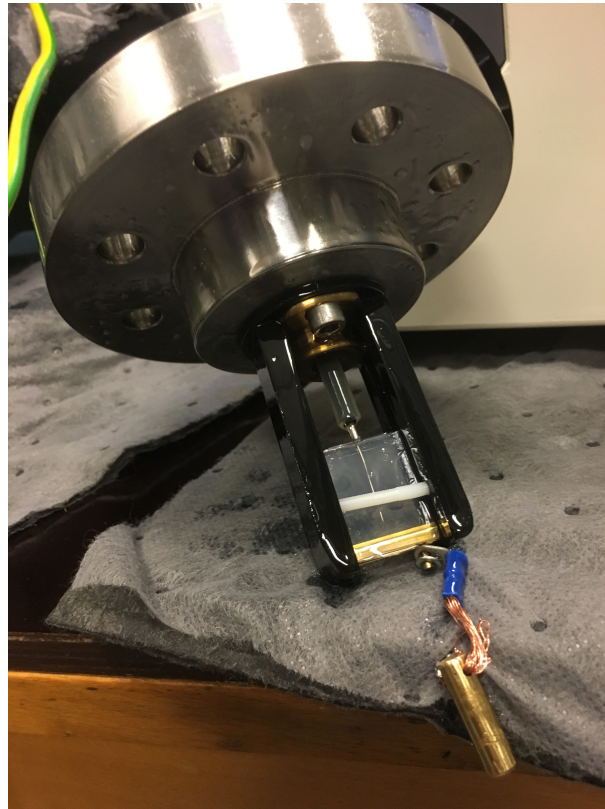
Figur 3.4.2: Trykktank brukt til eksperimenter

Beregninger utført av SINTEF Energi AS viste at boltene i topp og bunn av trykktanken skulle strammes til med et moment på 44 Nm for at lokket ikke skulle fly av trykktanken ved trykkøning. Flensene ble skrudd til med et moment på 6,7

Nm.

3.4.2 Festing av testobjekt og kabelgjennomføring.

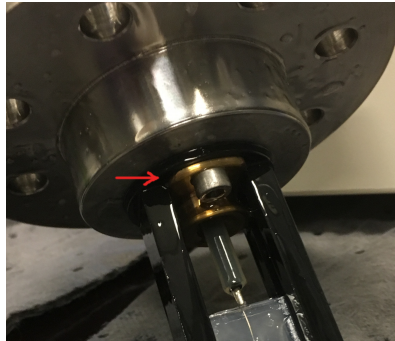
Testobjektene ble ført inn i et spor på en plasthenger som stakk ut på innsiden av lokket, se figur 3.4.3. En lisse med et lodd ble skrudd fast i jordelektroden i testobjektene. Loddet nådde bunnen av tanken når lokket var festet til trykktanken. Akupunktur nålen ble klippet kortere i toppen for at jordelektroden skulle ligge kant i kant nederst på plasthengene. Når testobjektet ble festet var det viktig at lederen i kabelen hadde kontakt med toppen av akupunktur nålen.



Figur 3.4.3: Testobjekt festet til lokket av trykktanken.

En miniatyrkabel var trukket gjennom lokket til trykktanken og på innsiden av

lokket var det en feltstyrer i messing. Denne er merket med en pil i figur 3.4.4. På innsiden av feltstyreren ble isolasjonen til kabelen skrellet av for å komme i kontakt med oljen i trykktanken.



Figur 3.4.4: Utsnitt av figur 3.4.3 hvor feltstyreren i messing er markert.

3.5 Måling av partielle utladninger i et elektrisk tre med lengde 0,5 mm

For denne oppgaven ble det besluttet å studere trykkpåvirkning på partille utladninger og elektrisk trevekst ved at et elektrisk tre på 0,5 mm allerede eksisterte i testobjektene før PD-måling startet. Spenningen var skrudd helt ned før PD-måling ble gjennomført, så det var ingen utladninger i det 0,5 mm lange treet. Dette gjaldt både for tørre og oljemettede testobjekter. Dette delkapittelet forklarer hvordan forsøkene ble gjennomført.

En spenning på 10 kV ved atmosfærisk trykk ble påført tørre testobjekter, en spenning på 14 kV ble påført oljemettede testobjekter. Grunnen til at 10 kV ble valgt, var at dette var spenningen som ble brukt for å skape elektrisk trevekst ved atmosfærisk trykk i prosjektoppgaven [6] denne masteroppgaven bygger på og 14 kV ble valgt til oljemettede testobjekter fordi trevekst ikke startet ved 10 kV. Elektrisk trevekst startet umiddelbart etter påført spenning og treet ble grodd til det hadde nådd en lengde på 0,5 mm. Spenningen ble da skrudd ned. Det var dermed et tre på 0,5 mm i testobjektene, men ingen utladninger i de elektriske trærne

når forsøkene ble startet.

Det ble gjennomført 10 serier med forsøk, fem serier med tørre testobjekter og fem serier med oljemettede testobjekter. De fem respektive forsøkene ved oljemettede og tørre testobjekter ble utført ved:

- 1 bar
- 10 bar
- 20 bar
- 40 bar
- 80 bar

Hver serie ble utført i rekkefølgen gitt av listen over.

Spenningen ble økt med 0,5 kV per femte minutt til tennspenningen ble nådd. Tennspenningen er den laveste spenningen under forsøket hvor utladninger observeres [9]. Deretter ble spenningen skrudd ned 0,5 kV hvert femte minutt til slukkespenningen ble funnet. Slukkespenning er den høyeste spenningen hvor utladninger ikke lenger kan observeres [9].

OMICRON-systemet med MPD 600 ble brukt for å måle PD.

Kapittel 4

Resultater og diskusjon

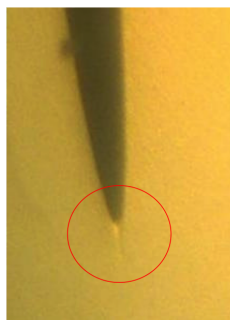
4.1 Oljemetting av testobjektene

Tabell 4.1.1: Seks testobjekter ble undersøkt for om avstand mellom nål og jordelektrode forholder seg konstant før og etter objektene ble oljemettet.

Testobjekt	Avstand mellom nål og jordelektrode[mm]					
	1	2	3	4	5	6
Testobjektene som tørre	1,98	1,80	1,85	2,08	1,80	1,88
Testobjektene som oljemettede	2,24	2,03	2,07	2,28	2,08	2,15

Det kan fra tabell 4.1.1 observeres at avstanden mellom jordelektrode og nål har økt i samtlige testobjekter etter de var oljemettede. Dette tyder på at oljen legger seg mellom silikonkjedene, se delkapittel 2.1 og 2.2, og at testobjektet følgelig sveller.

Etter testobjektene var ferdig mettet med olje, ble de studert under mikroskop. Det fremkom da at der for samtlige av testobjektene var et hulrom rett under

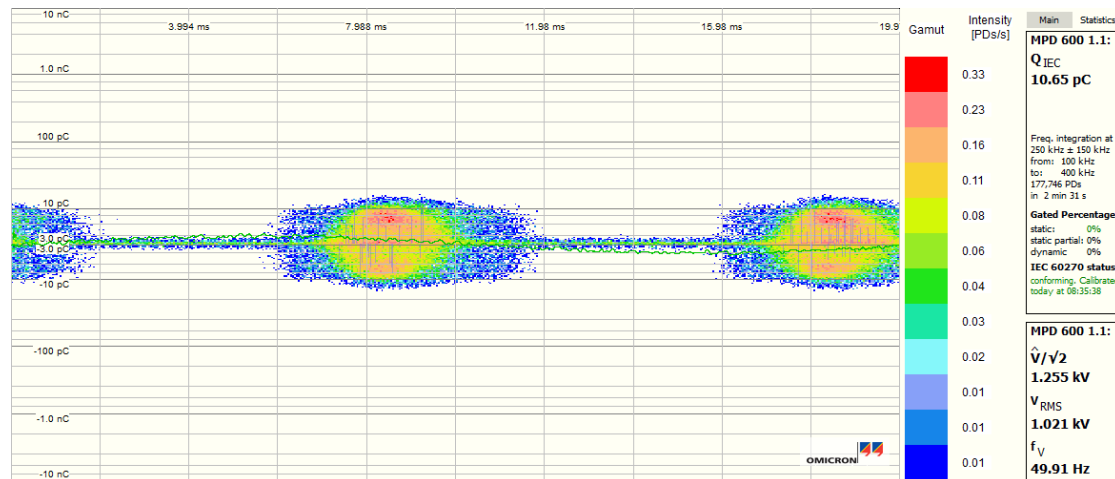


Figur 4.1.1: Utsnitt av oljemettet testobjekt med hulrom under nålspissen, 40x forstørrelse.

nålen, se figur 4.1.1. Hulrom rett under nålen ble også observert i noen få av de tørre testobjektene. Rune Gravaune [4] observerte også hulrom i alle oljemettede testobjekter. Det kan være at hulrommene i både de oljemettede og tørre testobjektene ble skapt under støpeprosessen som følge av at nålen skled i formen, se delkapittel 3.1. Dersom dette er tilfelle burde det være noenlunde like mange tørre og oljemettede testobjekter som hadde hulrom under nålspissen. Siden det kun var noen få tørre testobjekter som hadde hulrom under nålspissen, kan det tyde på at de fleste hulrommene i oljemettede testobjekter skyldes noe annet enn at nålen skled under støping. Det er mulig at oljen svekket strukturen til silikon når det diffunderer inn, se delkapittel 2.2, og at silikonet svellet noe. En svekkelse i strukturen kan dermed ha skapt hulrom. En annen mulighet er at det har vært hulrom under nålspissen fra støping, men at det var vanskelig å observere i de tørre testobjektene. Riquet et al. [16] har gjort funn som tyder på at olivenolje som diffunderer inn i et polymer ikke vil endre oppbygningen til polymeret. Det er dermed mulig at olje generelt ikke vil ødelegge strukturen til polymer og at hulrommet ikke skapes grunnet diffusjon. Grunnen til at hulrom ble observert under nålspissen kan da forklares ut fra at det dannes hulrom i alle testobjekter, men at oljemettede testobjekter vil være mørkere på grunn av oljediffusjonen, og hulrommet synes derfor bedre.

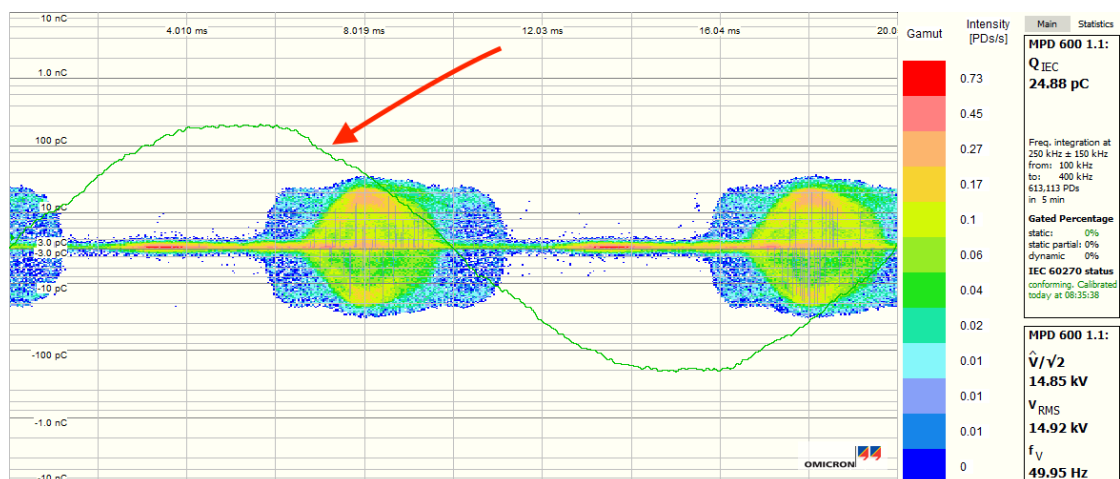
4.2 Støy i kretsen

Elektrisk måling av PD er sensitivt, noe som gjør at støy kan ødelgge målinger [18]. Det er derfor viktig å søke etter og eliminere støykilder i kretsen. I laboratoriet som ble brukt var det flere elementer som førte til støy. For å fjerne bakgrunnsstøyen fra målingene ble alle utladninger under 3 pC fjernet. Det er mulig at ved å fjerne alle utladninger under 3pC ble også hulromsutladninger knyttet til det elektriske treet fjernet. Litteraturen viser at en høyere påført spenning vil føre til større amplitude på utladningene. Dette er fordi en større mengde ladning injiseres i en utladning når spenningen er høy [19]. Hulromsutladninger grunnet trevekst vil derfor høyst sannsynlig være over 3 pC og ikke blir registrert som støy.



Figur 4.2.1: Utladninger uten testobjekt ved 1 kV.

Figur 4.2.1 viser en PD-måling ved 1 kV og uten trevekst. Det vil si at dette er bakgrunnsstøyen i kretsen. Like før sinuskurvens nullgjennomgang, både etter stigende og synkende flanke kan det observeres PD-utladninger i størrelsesorden opp mot 10 pC, ved høyere spenninger vil støyen ha større amplitude, se figur 4.2.2. Det ble forsøkt med akustisk PD-måling for å finne kilden til støy, men den ble ikke funnet. Sinuskurven til spenningen er ikke godt synlig på figur 4.2.1, men figur 4.2.2 viser sinuskurven bedre.



Figur 4.2.2: Utladninger uten testobjekt ved 15 kV. Pilen peker på sinuskurven til spenningen.

Fra figur 4.2.1 og figur 4.2.2 kan det observeres at støyen i kretsen ikke vil påvirke huromsutladninger da de vil opptre rundt den positivt stigende delen av sinuskurven og rundt den negativt synkende delen av sinuskurven, se delkapittel 2.3.2. Det ble derfor ikke brukt mye tid på å prøve å fjerne støyen.

Det kan fra figur 4.2.2 observeres at sinuskraven ikke er en ren sinus. Det ble derfor utført en frekvensresponsanalyse, men ingen harmoniske ble funnet. Grunnet til at sinusen ikke er ren, stammer dermed sannsynligvis fra en forstyrrelse i kretsen. Det ble ikke funnet hva denne forstyrrelsen var.

4.3 Måling av partielle utladninger

Det var vanskelig å kontrollere den elektriske treveksten slik at treet ble nøyaktig 0,5 mm før PD-testing startet. Fra serie til serie vil det derfor være små endringer i hvor langt det elektriske treet er ved 1 bar. Lengden av det elektrisk treet er målt før hvert forsøk ved de forskjellige trykkene i hver serie.

Tabell 4.3.1: Tennspenning (PDIV) og slukkespenning (PDEV) for tørre testobjekter ved forskjellig trykk. Tre viser til lengden på det elektriske treet før hvert forsøk ved hvert trykknivå per serie.

		Trykk [bar]				
		1	10	20	40	80
Serie 1	PDIV [kV]	8,5	11	14	15	–
	PDEV [kV]	6	10,5	11	13	–
	Tre [mm]	0,49	0,54	0,54	0,63	–
Serie 2	PDIV [kV]	4	11	15	16	21,5
	PDEV [kV]	3	8	14	15	21
	Tre [mm]	0,50	0,50	0,37	0,50	0,72
Serie 3	PDIV [kV]	3	4	6,5	14	17,5
	PDEV [kV]	2	1	5	13	13
	Tre [mm]	0,55	0,55	–	–	–
Serie 4	PDIV [kV]	3,5	10,5	12,5	17,5	21
	PDEV [kV]	2,5	6	6,5	16	19,5
	Tre [mm]	0,53	0,53	0,43	0,67	0,71
Serie 5	PDIV [kV]	3,5	11,5	16	19	–
	PDEV [kV]	2	7,5	9	13	–
	Tre [mm]	0,51	0,51	0,79	1,24	–
Median	PDIV [kV]	3,5	11	14	16	21,5
	PDEV [kV]	3	7,5	9	13	19,5

For forsøkene listet i tabell 4.3.1 er hver serie utført med ett testobjekt. Grunnen til at resultater for 80 bar uteble for serie 1 og serie 5, er at det ble så mye støy i kretsen at det ikke var mulig å se utladningene, se tillegg A. Det ble ikke funnet ut hva denne støyen skyldtes, men den samme typen støy ble ofte observert ved høye spenninger, det vil si spenninger over 20 kV.

For forsøk utført ved atmosfærisk trykk ble det målt partielle utladninger før det elektriske treet vokste for serie 2 -5. For forsøk utført ved høyere trykk var det kun i serie 3 at PD ble målt før det elektrisk treet vokste videre.

Både ved serie 2, serie 3 og serie 4 kan det observeres at lengden på det elektriske treet minket mellom starten av målingene ved 10 bar og starten av målingene ved 20 bar. Ved serie 3 forsvant det elektriske treet tilsynelatende helt, mens det ved serie 2 og serie 4 ble henholdsvis 0,13 og 0,10 mm kortere. Det at det elektriske treet blir mindre eller forsvinner kan ha sammenheng med at silikon er et mykt materiale, se delkapittel 2.1, og at kanalene dermed blir presset sammen under trykk. Dette får det elektriske treet til å framstå som kortere eller som om kanalene kollapser fullstendig. Hva trykk vil ha å si for elektrisk trevekst i silikon vil bli diskutert senere, i delkapittel 4.3.1.

Det at kanaler i silikon vil inneholde mindre karbon enn PE og PEX [10] vil også kunne være med å påvirke synligheten til et elektrisk tre og det er mulig at et tre vil bli mindre synlig jo lenger tid som har gått. Dersom spenningen er høyere er dette ikke særlig sannsynlig da mer karbon blir produsert når lenger tid har gått fordi mer av silikonet vil bli omgjort til gasser. Det er også gjort tidligere forsøk på trevekst i silikon [4] [6] over flere timer uten at det elektriske treet forsvant eller ble mindre synlig.

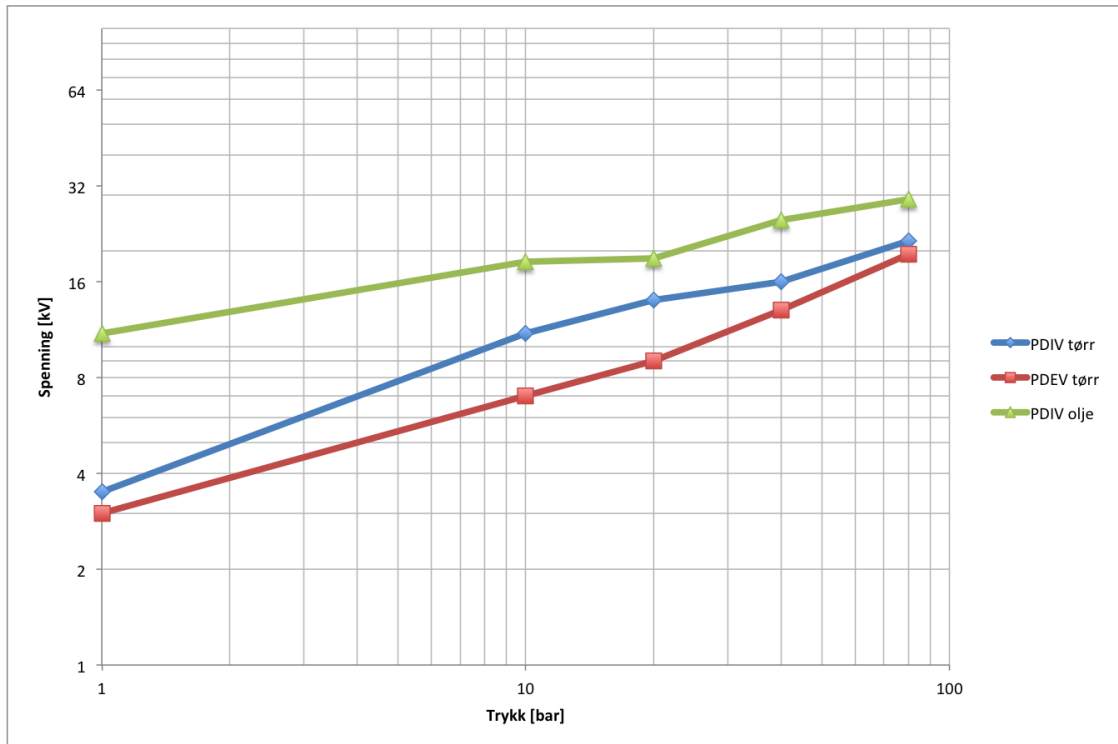
Tabell 4.3.2: Tennspenning (PDIV) og slukkespenning (PDEV) for oljemettede testobjekter ved forskjellig trykk. Tre viser til lengden på det elektriske treet før hvert forsøk ved hvert trykknivå per serie.

		Trykk [bar]				
		1	10	20	40	80
Serie 6	PDIV [kV]	10,5	8,5	15	25	29
	PDEV [kV]	6	7,5	14,5	23	–
	Tre [mm]	0,44	0,60	0,78	0,81	0,87
Serie 7	PDIV [kV]	12	18,5	22	21	30,5
	PDEV [kV]	7	17,5	–	–	–
	Tre [mm]	0,46	0,70	0,72	0,53	0,64
Serie 8	PDIV [kV]	9	20,5	19	29	24
	PDEV [kV]	5,5	–	–	–	–
	Tre [mm]	0,51	0,68	0,70	0,53	0,51
Serie 9	PDIV [kV]	12	15	15,5	25	29,5
	PDEV [kV]	11,5	14,5	–	–	–
	Tre [mm]	0,48	0,58	0,74	0,56	1,11
Serie 10	PDIV [kV]	11	20,5	23	26,5	25
	PDEV [kV]	5,5	–	–	–	–
	Tre [mm]	0,49	0,64	0,47	0,54	0,51
Median	PDIV [kV]	11	18,5	19	25	29
	PDEV [kV]	6	–	–	–	–

For de oljemettede testobjektene ble det uten unntak observert at PD forekom samtidig som elektrisk trevekst. Dette kan ha sammenheng med at tennspenningen er høy og at det elektriske feltet dermed vil bli såpass høyt at det elektriske treet vokser.

For forsøk listet i tabell 4.3.2 er ikke hver serie utført med samme testobjekt. Jo høyere spenning som ble påført testobjektet, desto raskere vokste det elektriske treet til gjennomslag. Under testing av serie 7 ble det gjennomslag i testobjektet før det var mulig å skru ned spenningen. For å beskytte PD-målingsutstyret ble det derfor besluttet å koble fra koblingskondensatoren og følgelig også PD-målingsutstyret ved spenninger over 15 kV. Basert på målinger fra serie 1-6 og ble det antatt at PD startet når det elektriske treet vokste. Alle forsøk i tabell 4.3.2 som har tennspenning og ikke slukkespenning oppgitt er forsøk som er gjort uten koblingskondensator og PD-målingsutstyr tilkoblet. Tennspenningen er da spenningen hvor det elektriske treet vokste videre fra 0,5 mm.

For forsøk med både oljemettede og tørre testobjekter ble det observert at dersom det elektriske treet vokste videre fra 0,5 mm, var det ikke mulig å måle PD i fem minutter fordi treet vokste så fort. Det ble i de nevnte tilfellene besluttet å skru ned spenningen før fem minutter hadde gått for å forhindre gjennomslag. Berg et al. [21] observerte at ved trykk fra 10 bar og oppover vokste elektriske trær initiert i silikon svært fort og gjennomslag forekom innen et kort tidsintervall, gjerne innen et par sekunder.

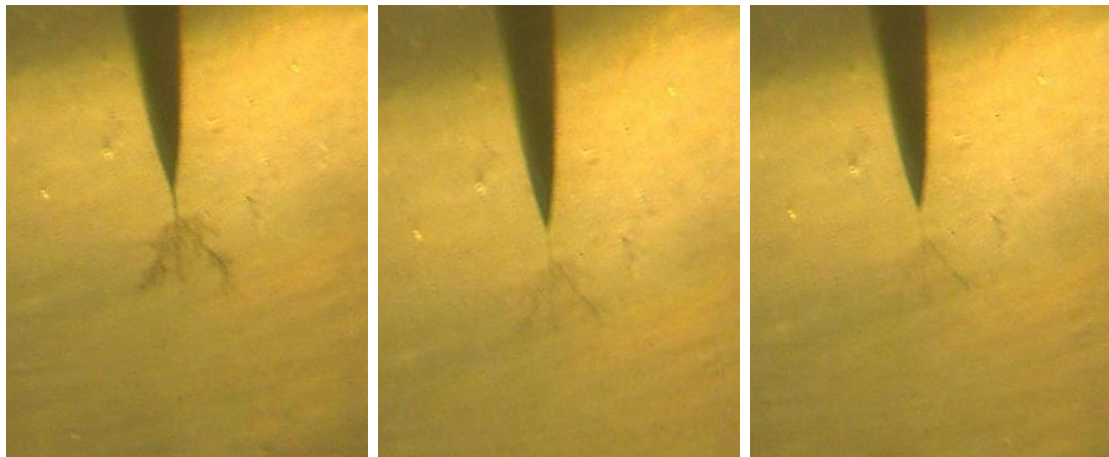


Figur 4.3.1: Median av tennspenning og slukkespenning som funksjon av de forskjellige trykkene. Logaritmisk skala.

Fra figur 4.3.1 kan det observeres at tennspenning og slukkespenning øker tilnærmet lineært med trykket i et log-log-diagram. Det kan også observeres at tennspenningen til oljemettede testobjekter er høyere enn tennspenningen til tørre testobjekter. Hvilken innvirkning olje har på tennspenning og elektrisk trevekst vil bli diskutert i delkapittel 4.3.2.

4.3.1 Påvirkning av trykk

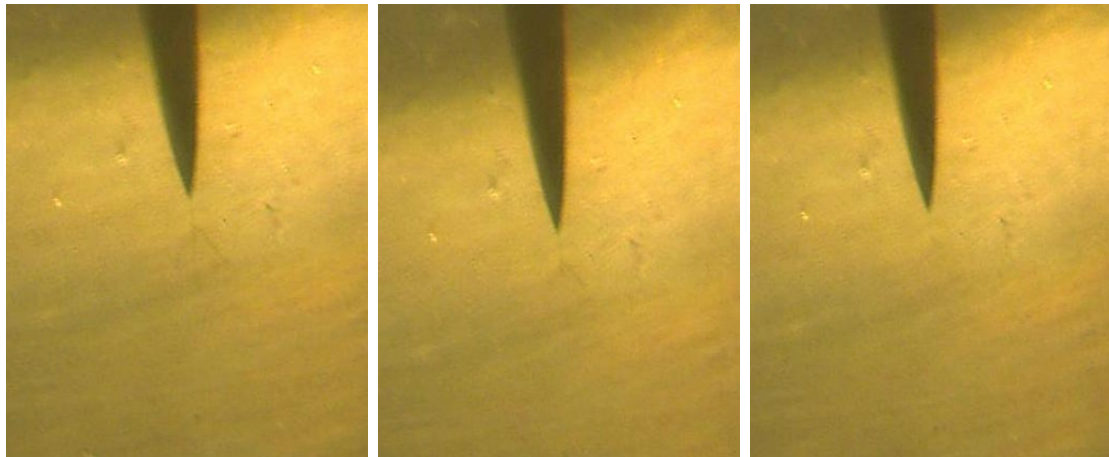
Under forsøk med tørre testobjekter ble det i alle seriene observert at kanalene i de elektriske trærne tilsynelatende forsvant etter at trykke ble økt fra 1 bar til 10 bar. Figur 4.3.2 viser dette fenomenet.



(a) Elektrisk trevekst i tørt testobjekt rett etter tanken var trykket opp til 10 bar.

(b) Elektrisk trevekst i tørt testobjekt 1 min etter tanken var trykket opp til 10 bar.

(c) Elektrisk trevekst i tørt testobjekt 3 min etter tanken var trykket opp til 10 bar.



(d) Elektrisk trevekst i tørt testobjekt 4 min etter tanken var trykket opp til 10 bar.

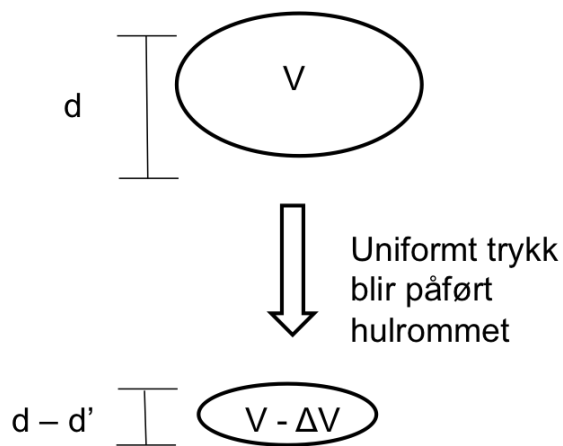
(e) Elektrisk trevekst i tørt testobjekt 5 min etter tanken var trykket opp til 10 bar.

(f) Elektrisk trevekst i tørt testobjekt 6 min etter tanken var trykket opp til 10 bar.

Figur 4.3.2: Trevekst ved atmosfærisk trykk og 10 bar fra serie 4. Tørt testobjekt. Påtrykt spenning var 4 kV for figur 4.3.2a - 4.3.2e og 4,5 kV for figur 4.3.2f.

Figur 4.3.2 og observasjoner gjort under forsøkene da trykket ble økt fra 1 bar til 10 bar kan tyde på at kanalene i silikon kollapser når trykket øker. Det kan tenkes at kanalene i silikon, som er et mykt materiale i den forstand at det deformeres med økende mekanisk trykk [12], vil bli klemt helt sammen når trykket øker. Et

spørsmål som melder seg dersom det antas at kanalene blir klemt fullstendig sammen, er hva som skjer med gassene i kanalene, se delkapittel 2.4. Det er mulig at hulrommene blir så små at de ikke synes, men at det fortsatt eksisterer hulrom. Det er tidligere gjort forsøk med PE hvor hulrom i isolasjonen ble mindre når den ble utsatt for hydrostatisk trykk [32]. Fra figur 4.3.2 vil det være vanskelig å se små hulrom som eventuelt eksisterer i silikonet.



Figur 4.3.3: Hvordan et hulrom kan bli deformert dersom det utsettes for uniformt trykk.

Figur 4.3.3 viser hvordan et hulrom kan bli deformert av uniformt trykk. Det kan observeres at volumet til hulrommet blir mindre, noe som fører til at gassene i hulrommet får mindre plass å bevege seg på.

Den ideelle gassloven lyder:

$$PV = nRT \quad (4.3.1)$$

hvor:

P = Trykk

V = Volum

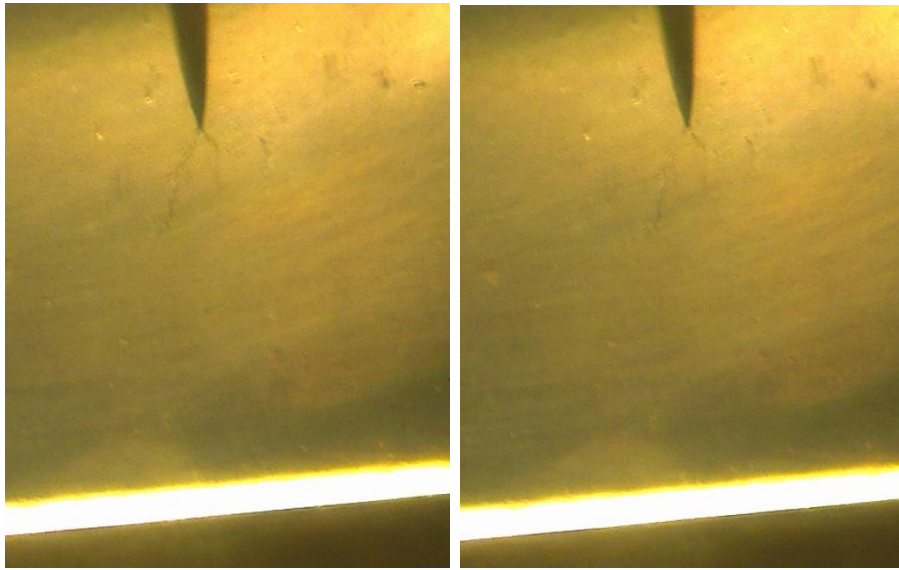
n = Antall mol i gassen

R = Den universelle gasskonstanten: $8,314 \frac{J}{molK}$

T = Temperatur, målt i Kelvin

Når et hulrom blir deformert vil også trykket inne i hulrommet øke. Dette kan sees av ligning 4.3.1. Dersom volumet til hulrommet minker og temperaturen er konstant i tillegg til at all gass er innkapslet i hulrommet, må følgelig trykket i hulrommet øke. Paschenkurven, se delkapittel 2.4.2, viser da at det må en høyere spenning til for å skape trevekst. Dette er fordi det vil være en bevegelse mot høyre i Paschenkurven. Det at figur 4.3.1 viser at tennspenning og slukkespenningen øker dersom det påføres et høyere trykk stemmer dermed godt overens med delkapittel 2.4.5 samt det som er skrevet i dette delkapittelet.

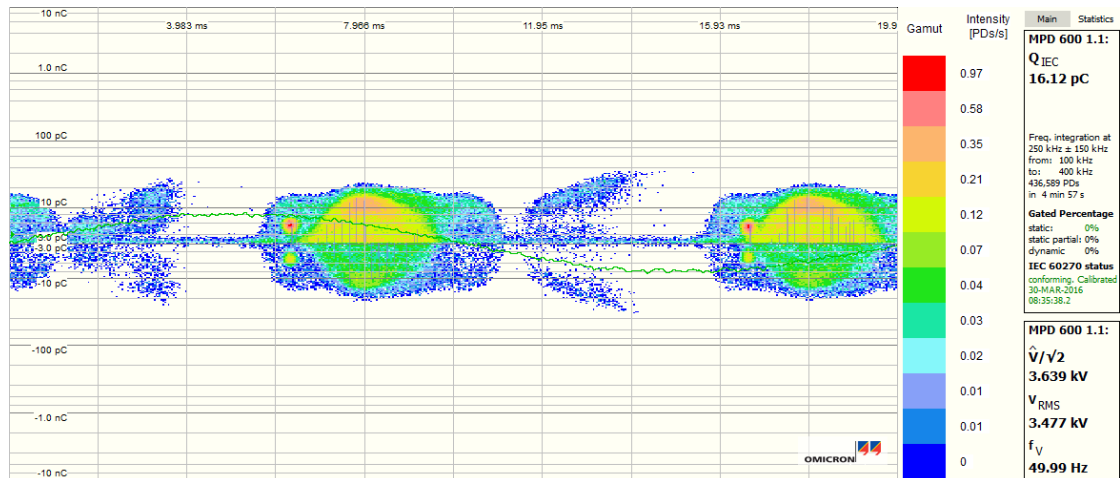
Det ble i delkapittel 4.3 i forbindelse med tabell 4.3.1 nevnt at PD ikke forekom uten at det elektriske treet vokste videre, med unntak av ved 1 bar. Det ble også observert at dersom det elektriske treet vokste ved 10 bar eller ved høyere trykk, forsvant ikke treet slik det gjorde mellom 1 bar og 10 bar. I enkelte av forsøkene så det ut som kanalene ble noe mindre og tynnere, men de forsvant aldri helt. Figur 4.3.4 viser dette fenomenet. Det ble også observert at det tok lenger tid for kanalene å bli mindre dersom det sammenlignes med forsøk hvor trykket ble økt fra 1 til 10 bar. Desto høyere trykk treet vokste ved desto mindre av treet forsvant når trykket ble økt. Det er mulig at kanalene i det elektriske treet vil ha større diamenter når det vokser ved et høyere trykk. Dette er fordi at PD med større amplitude vil skape større ødeleggelser av isolasjonsmaterialet [19].



(a) Elektrisk trevekst i tørt testobjekt rett etter tanken er trykket opp til 40 bar.

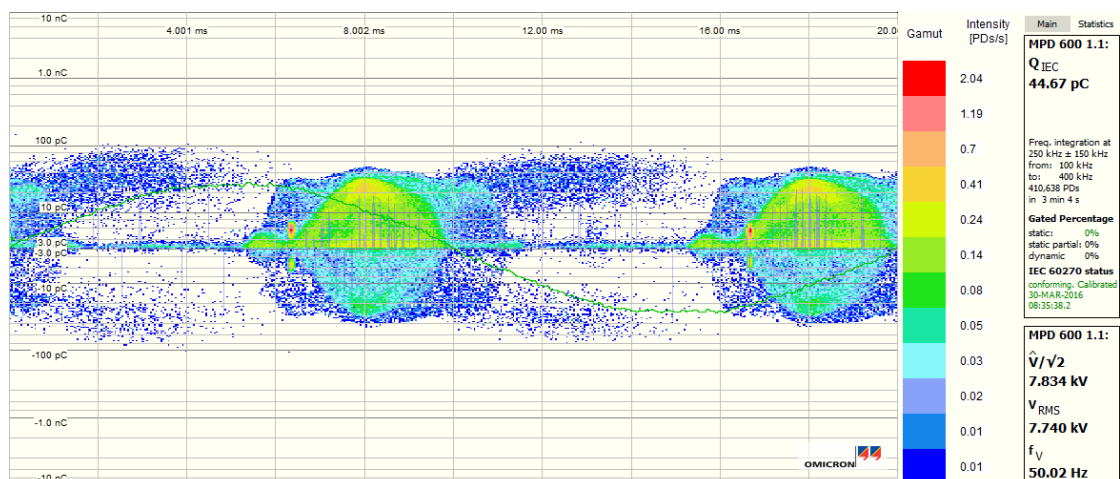
(b) Elektrisk trevekst i tørt testobjekt 60 min etter tanken var trykket opp til 40 bar.

Figur 4.3.4: Hvordan det elektriske treet oppfører seg etter det hydrostatiske trykket har økt fra 20 til 40 bar.



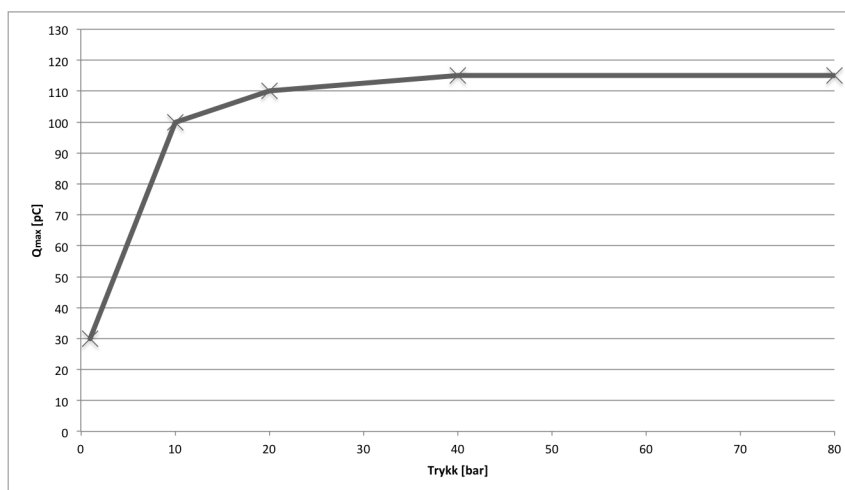
Figur 4.3.5: PD etter tennspenning ved 1 bar, hentet fra serie 4. PD er målt i 5 minutter.

Bildene av utladninger ved 20, 40 og 80 bar er lagt i tillegg B fordi de ikke skiller seg nevneverdig ut fra figur 4.3.6. Utladningene hadde ved 10, 20, 40 og 80 bar



Figur 4.3.6: PD etter tennspenning ved 10 bar, henter fra serie 4. PD er målt i 3 minutter.

forholdsvis lik form og størrelse. Figur 4.3.7 viser hvor mye maksimal ladning øker med trykket. De maksimale ladningene øker kun med 15 pC når trykket øker fra 10 bar til 80 bar. Grunnen til at spenningen som er oppgitt til høyre på figur 4.3.6 er lavere enn i tabell 4.3.1 er fordi spenningen i flere tilfeller måtte bli skrudd ned før bildene ble lagret for at det elektriske treet ikke skulle vokse til gjennomslag.



Figur 4.3.7: Maksimal utladning ved de respektive hydrostatiske trykkene. Dataene er hentet fra serie 4 fordi det er denne serien som er framtilt i $\Phi - q - n$ -diagrammene over.

Dersom figur 4.3.5 og figur 4.3.6 sammenlignes, kan det observeres at utladningene både ved 1 bar og ved 10 bar forekommer ved stigende og synkende flanke etter nullgjennomgang på sinuskurven. Dette er typisk for hulromsutladninger, se delkapittel 2.3.2. Utladningene ved 10 bar er i størrelsesorden opp mot 100 pC og følgelig mye større enn ved 1 bar. Det er også mye mer PD-aktivitet ved 10 bar selv om målingene er utført over et kortere tidsrom. Siden utladninger med høyere amplitude har større energi, fører de til større ødeleggelser av isolasjonsmaterialet [19]. Med ødeleggelser menes det her kanaldannelse. Det er dermed rimelig å anta at ødeleggelsene av silikonet er større ved 10 bar enn 1 bar.

Det at kanaler ikke forsvinner dersom de har oppstått ved 10 bar eller høyere trykk, kan forklares med at silikonet ødelegges i større grad og selv om trykket økes igjen vil kanaldannelsene i silikonet kunne foregå med såpass stor kraft at trykket ikke klarer å presse kanalene sammen. Tidligere i delkapittelet ble det vist at trykket innad i kanalene vil øke ved en deformasjon. Dette vil også kunne være en medvirkende årsak til at kanalene ikke blir presset sammen ved høyere trykk. Dersom kanalene blir større ved høyere trykk, vil en større mengde gass samle seg i kanalene enn ved mindre kanaler. Dette er fordi mer fast stoff vil bli omgjort til gass, se delkapittel 2.4. Følgelig vil det kunne være et høyere trykk i en stor kanal som blir deformert.

Basert på Svein Magne Hellesæs [33] modell i COMSOL hvor det ble modellert at hydrostatisk trykk ble påført en synlinderisk kanal kan det observeres at kanalen blir mer deformert desto høyere trykk som blir påført, se tillegg C. Det kan også observeres at trykket innad i kanalen øker desto høyere hydrostatisk trykk som ble påført modellen. Simuleringen i COMSOL stemmer derfor godt overens med resultatene i denne oppgaven.

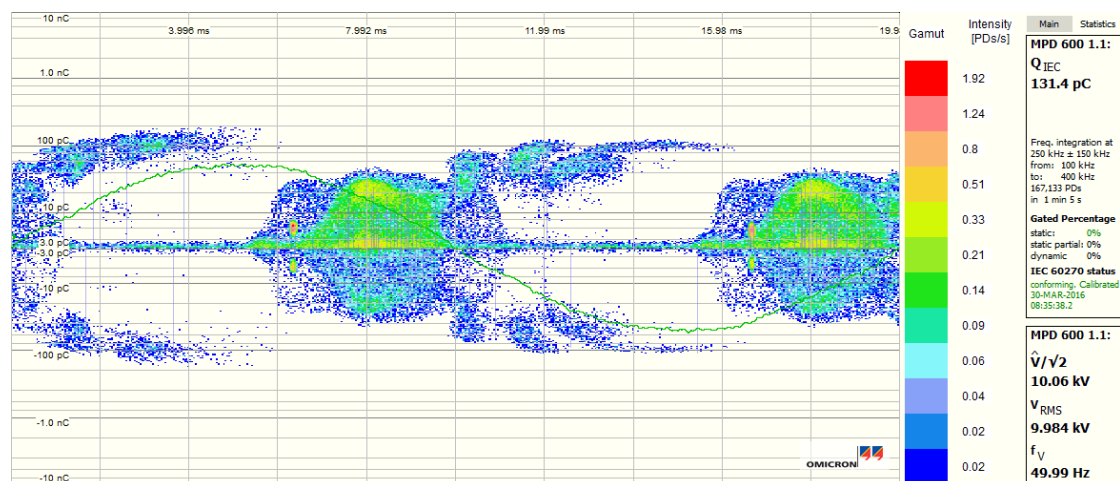
Tabell 4.3.1 viser at spennings og slukkespenning konsekvent øker med økt trykk, så det er rimelig å anta at et høyere trykk deformerer kanalene mer og mer og at trykket innad i kanalene øker. Dermed vil ikke kanalene bli presset fullstendig

sammen på grunn av større ødeleggelser i silikonet samt høyere trykk i kanalene.

Basert på dette delkapittelet vil **hypotese 1 og 2 gjelde**: Tennspenning og slukke-
spenning er høyere desto høyere hydrostatisk trykk testobjektet er satt under.

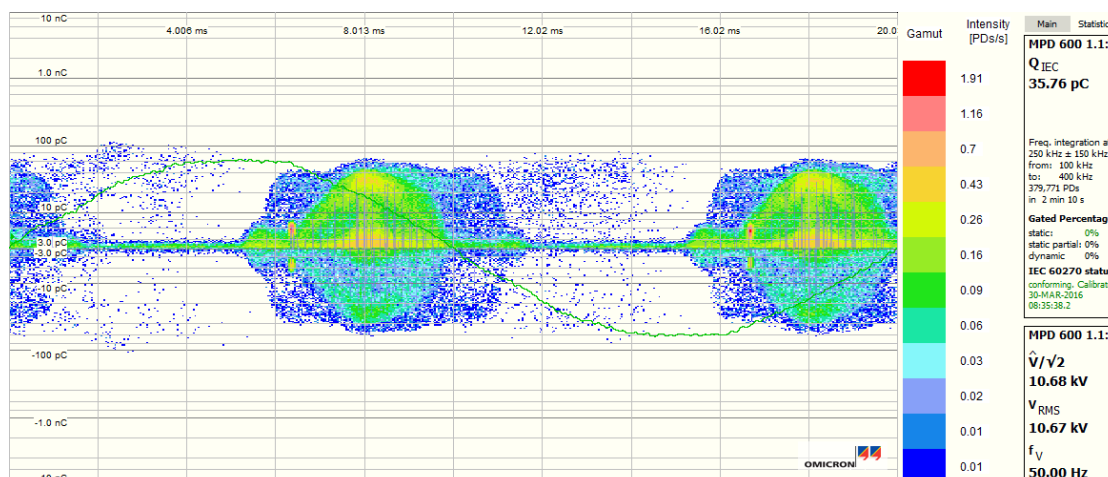
4.3.2 Oljens innvirkning på elektrisk trevekst

Dersom figur 4.3.1 studeres, kan det observeres at tennspenningen til oljemettede testobjekter er konsekvent høyere enn tennspenningen til tørre testobjekter. Rune Gravaune [4] fant i sin masteroppgave at gjennomslagsspenningen i oljemettede testobjekt var 4,3 kV høyere enn i tørre testobjekter ved 1 bar, og 7 kV høyere ved 50 bar. Olje vil ha andre dielektriske egenskaper enn luft og når oljen trekker inn i alle hulrom i testobjektet vil det kunne påvirke tennspenningen.



Figur 4.3.8: PD etter tennspenning ved 1 bar, hentet fra serie 9. PD er målt i ca 30 sekunder

I de oljemettede testobjektene ble det ikke observert at treet forsvant når trykket ble økt og fra figur 4.3.8 og 4.3.9 kan det observeres at de partielle utladningene er i størrelsesorden rundt 100 pC både ved 1 bar og 10 bar. Det er vanskelig å sammenligne PD-aktiviteten da det elektriske treet i begge tilfeller vokste så fort at



Figur 4.3.9: PD etter tennspenning ved 10 bar, hentet fra serie 9. PD er målt i et par sekunder.

det ble foretatt målinger på under 30 sekunder. Det kan se ut som PD-aktiviteten spenner seg over et litt større areal i figur 4.3.9, men dette kan også ha sammenheng med at utladningene har mindre amplitude når spenningen blir skrudd ned.

Dersom figur 4.3.8 sammenlignes med figur 4.3.6 kan det observeres at de har lik form. Dette tyder på at det i oljemettede testobjekter allerede ved 1 bar skapes såpass store ødeleggelser og trykkøkning i kanalene til silikonet at et økt hydrostatisk trykk ikke vil presse kanalene sammen. Det kan være at oljen i testobjektene påvirker veggene til kanalene og at det fører til at tennspenningen er høyere i oljemettede testobjekter enn i tørre testobjekter, men det ikke funnet noe litteratur om emnet.

Rune Gravaune [4] viste at de mekaniske egenskapene til silikon mettet med olje og tørr silikon vil være forskjellige. Både gjennomsnittlig strekkraft og prosentvis forlengelse ved brudd var større for tørr silikon enn for oljemettet silikon [4]. På bakgrunn av dette vil E-modulen for oljemettede og tørre testobjekter være forskjellig da E-modulen er definert som forholdet mellom fasthet og forlengelse, se delkapittel 2.6. Delkapittel 2.4.1 og fortalte at initiering av elektrisk trevekst er

avhengig av de mekaniske egenskapene til et isolasjonsmateriale og de mekaniske egenskapene til oljemettet silikon vil dermed være en forklaring på den økte tennspenningen.

Basert på dette delkapittelet vil **hypotese 3** være feilaktig. Oljemettede testobjekter vil ha en høyere tennspenning enn tørre testobjekter.

4.3.3 Lengde på trevekst og tennspenning

Det at det elektriske treet var 0,5 mm før måling av PD startet kan ha hatt mye å si for utladningene. Det er rapportert i litteraturen at jo lenger treveksten er i PEX, desto større vil utladningene være [19]. Siden silikon inneholder mindre karbon enn PEX, se delkapittel 2.1, er det ikke sikkert at kanalene i et elektrisk tre i silikon vil være like ledende. Det er derfor mulig at det ikke vil være noen stor forskjell på tennspenning i et testobjekt med et elektrisk tre på 0,5 mm og et testobjekt uten et elektrisk tre.

4.4 Feilkilder

4.4.1 Bilder av elektrisk trevekst

Mikroskopet som ble brukt hadde et objektiv med 40 ganger forstørrelse. Dette var ikke helt optimal forstørrelse, da bildet ble relativt stort i forhold til området som var interessant. Objektivet stod ca 4 cm utenfor tanken for å få et skarpt bilde. Med et objektiv med større forstørrelse er det mulig at bildene og dermed også målene på treets utvikling ville fått større nøyaktighet.

Ekstern belysning ble brukt når bildene ble tatt og det var noe problematisk å stille inn lyset slik at objektivet fanget opp den elektriske treveksten tydelig. I tillegg måtte det en del krefter til for å skru både opp og igjen lokket til trykktanken.

Trykktanken flyttet derfor alltid noe på seg når et nytt testobjekt skulle installeres. Lysforholdene ble derfor ikke identiske for bildene.

4.4.2 Målinger

Det vil alltid være noe unøyaktighet i målinger. Når målinger av avstanden mellom nål og jordelektrode ble utført, var det ikke mulig å få jordelektroden og nålen i fullstendig fokus samtidig. Dette fordi nålen satt midt i testobjektet mens jordelektroden lå helt ytterst i silikonmaterialet, se figur 3.1.1. Dermed kan det være at lengden mellom nålen og jordelektroden avviker noe fra de verdiene som er gitt i oppgaven.

4.4.3 Kalibrering av spenning i kretsen

Under PD-forsøkene ble OMICRON-systemet kalibrert for å måle spenningen. Det var ikke mulig å kalibrere spenningen helt nøyaktig og derfor kan spenningene som er oppgitt i oppgaven avvike noe fra spenningene som virkelig var i kretsen. Det vil ikke være store forskjeller, så det er antatt at dette ikke påvirker resultatene.

Kapittel 5

Konklusjon

Denne oppgaven har kommet frem til følgende:

- Under støping av testobjekter vil det på grunn av dårlig heft skapes et hulrom under nålpissen. Dette gjelder både for oljemettede og tørre testobjekter. Hulrommene vil ved oljemettede testobjekter være fylt av oljen som har diffundert inn.
- Tennspenning og slukkespenning i et elektrisk tre med lengde 0,5 mm vil øke dersom et høyere hydrostatisk trykk blir påført. Dette er fordi kanalene blir presset sammen, noe som fører til at trykket i kanalene vil øke. Paschenkurven forteller da at tennspenningen vil øke.
- Oljemettede testobjekter vil ha høyere tennspenning enn tørre testobjekter. Dette gjelder uansett hvilket hydrostatisk trykk som er påført. Det vil også være rimelig å anta at slukkespenningen til oljemettede testobjekter også er høyere. Oljemettede testobjekter har høyere tennspenning fordi oljen endrer de mekaniske egenskapene til silikonet.
- Det elektriske treet vokser med stor hastighet ved høye trykk og det kan derfor være vanskelig å stoppe elektrisk trevekst før gjennomslag.

Kapittel 6

Videre arbeid

Følgende foreslås som videre arbeid:

- For å støpe testobjekter uten hulrom foran nålspissen bør støpeformen forbedres. Det er mulig å legge inn en ekstra festemekanisme for nålen for at den ikke skal skli.
- Finne tennspenning og slukkespenning i tørre og oljemettede testobjekter uten at det er et elektrisk tre på 0,5 mm der fra før. Dette for å kunne studere hvordan tennspenning og slukkespenning er avhengig av lengden på det elektriske treet.
- Skjære opp testobjekter hvor elektrisk trevekst har foregått og studere kanalene i treet i mikroskop. Det er da blant annet mulig å påføre trykk på kanalene og observere hva som skjer med kanalene.
- Studere PD ved en konstant spenning og øke trykket for å observere om PD slukker.
- Sammenligne elektrisk trevekst og PD i silikon med andre isolasjonsmaterialer.

Bibliografi

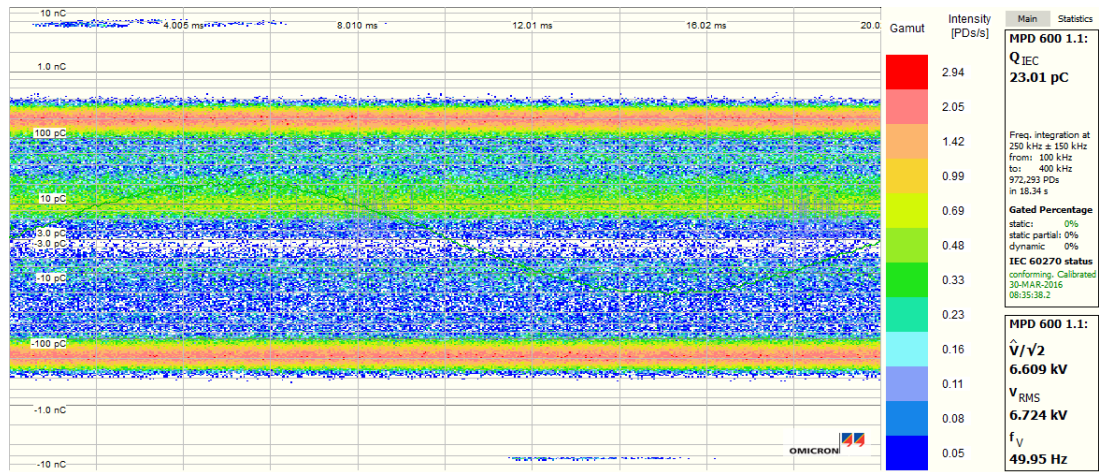
- [1] D. Panagiotopoulos, “Ac electrical breakdown strength of solid solid interfaces,” Master’s thesis, Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet, 2015.
- [2] J. T. Myklatun, “Condition monitoring of subsea connectors,” Master’s thesis, Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet, 2014.
- [3] Siemens, *specTRON, Medium & High Power Electrical Connector Systems for the Oil & Gas industry*.
- [4] R. Gravaune, “Elektrisk trevekst i isolasjonsmaterialer for høyspente ac konnektorer,” Master’s thesis, Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet, 2015.
- [5] T. E. Ten Hulscher and G. Cornelissen, “Effect of temperature on sorption equilibrium and sorption kinetics of organic micropollutants-a review,” *Chemosphere*, vol. 32, no. 4, pp. 609–626, 1996.
- [6] I. Spurkeland, “Elektrisk trevekst i isolasjonsmaterialet silikon i konnektorer ved høyspent vekselspanning,” Master’s thesis, Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet, 2015.
- [7] <http://albright1.com/siliconerubber/> , 14. November 2015 2015.
- [8] A. Tiwari and M. D. Soucek, *Concise Encyclopedia of High Performance Silicones*. John Wiley & Sons, 2014.
- [9] E. Ildstad, *High Voltage Insulation Materials*. Nidarosveien 12, 7005 Trondheim: Kompendieforlaget, 2014.

- [10] T. Ebke, A. Khaddour, and D. Peier, “Degradation of silicone gel by partial discharges due to different defects,” in *Dielectric Materials, Measurements and Applications, 2000. Eighth International Conference on (IEE Conf. Publ. No. 473)*, pp. 202–207, IET, 2000.
- [11] S.-H. Kim, E. Cherney, R. Hackam, *et al.*, “Hydrophobic behavior of insulators coated with rtv silicone rubber,” *Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, vol. 27, no. 3, pp. 610–622, 1992.
- [12] ShinEtsu, “Characteristic properties of silicone rubber compounds,” tech. rep., ShinEtsu, 2012.
- [13] Y. Kamiya, Y. Muramoto, and N. Shimizu, “Influence of vacuum evacuation on electrical tree initiation in silicone rubber,” in *Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2006 IEEE Conference on*, pp. 712–715, IEEE, 2006.
- [14] B. Gong, Y. Tu, Y. Zhou, R. Li, F. Zhang, Z. Xu, and D. Liang, “Moisture absorption characteristics of silicone rubber and its effect on dielectric properties,” in *Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), 2013 IEEE Conference on*, pp. 430–433, IEEE, 2013.
- [15] S. J. Metz, *Water vapor and gas transport through polymeric membranes*. University of Twente, 2003.
- [16] A. Riquet, N. Wolff, S. Laoubi, J. Vergnaud, and A. Feigenbaum, “Food and packaging interactions: determination of the kinetic parameters of olive oil diffusion in polypropylene using concentration profiles,” *Food Additives & Contaminants*, vol. 15, no. 6, pp. 690–700, 1998.
- [17] L. A. Dissado and J. C. Fothergill, *Electrical degradation and breakdown in polymers*. No. 9, IET, 1992.
- [18] L. Lundgaard, “Partielle utladninger. begreper, måleteknikk og mulige anvendelser for tilstandskontroll,” tech. rep., SINTEF Energi AS, 1996.
- [19] E. Kasinthan, A. Mahajan, and N. Gupta, “Phase resolved pd patterns in electric treeing,” *Journal of Electrical Engineering*, p. 6.

- [20] H. Illias, T. S. Yuan, A. H. A. Bakar, H. Mokhlis, G. Chen, and P. L. Lewin, "Partial discharge patterns in high voltage insulation," in *Power and Energy (PECon), 2012 IEEE International Conference on*, pp. 750–755, Dec 2012.
- [21] G. Berg, H. H. Sæternes, 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*, pp. 609–612, IEEE, 2012.
- [22] B. Du, Z. 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*, pp. 37–40, IEEE, 2009.
- [23] B. Du, Z. M. Y. Gao, and T. Han, "Effect of temperature on electrical tree in silicone rubber," in *Solid Dielectrics (ICSD), 2010 10th IEEE International Conference on*, pp. 1–4, IEEE, 2010.
- [24] G. Chen and C. Tham, "Electrical treeing characteristics in xlpe power cable insulation in frequency range between 20 and 500 hz," *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, vol. 16, no. 1, pp. 179–188, 2009.
- [25] N. Shimizu and C. Laurent, "Electrical tree initiation," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 5, pp. 651–659, Oct 1998.
- [26] K. Stokland, "Elektrisk trevekst i ekstrudert polypropylen (pp) kabelisolasjon," Master's thesis, Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet, Juni 2010.
- [27] J. Holto and E. Ildstad, "Electrical tree growth in extruded s-polypropylene," in *2010 10th IEEE International Conference on Solid Dielectrics*, pp. 1–4, July 2010.
- [28] G. Chen and C. Tham, "Electrical treeing in xlpe insulation in frequency range between 20 and 500 hz," 2005.

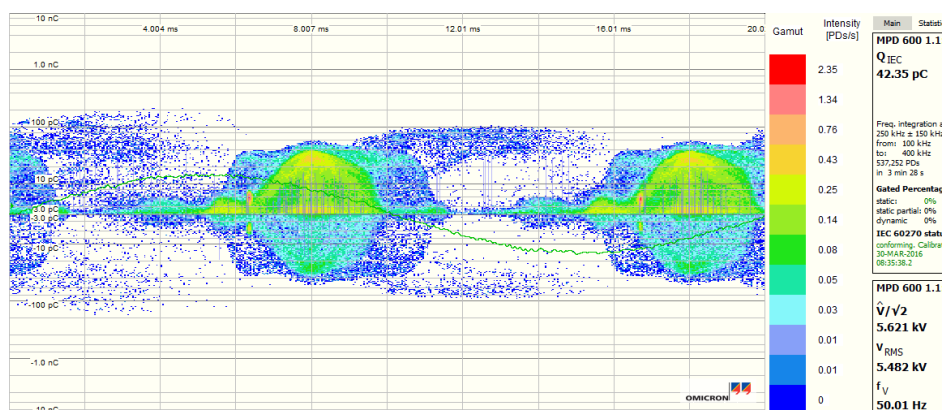
- [29] http://www.ipf.uni-stuttgart.de/lehre/plasmaphys/p70_03.htm, 3 Mars 2016.
- [30] D. R. Akseland and P. P. P., *The Science and Engineering of Materials*. Thomson, fifth ed., 2006.
- [31] D. Auckland and B. Varlow, “Dependence of electrical tree inception and growth on mechanical properties,” in *Science, Measurement and Technology, IEE Proceedings A*, vol. 138, pp. 51–54, IET, 1991.
- [32] H.-K. Xie, D.-M. Tu, and K. C. Kao, “Effects of hydrostatic pressure on electric discharge and treeing properties in polyethylene,” *Journal of Electrostatics*, vol. 16, pp. 115–121, 1984.
- [33] S. M. Hellesæ. personlig kommunikasjon, 2016.
- [34] V. K. Mørk, “Karakterisering av silikongummi for hvdc subsea-konnektorer,” Master’s thesis, Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet, 2016.

Tillegg A

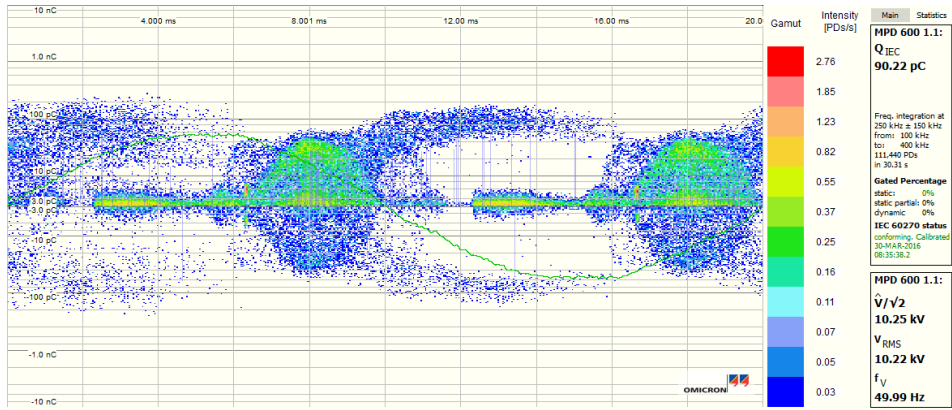


Tillegg B

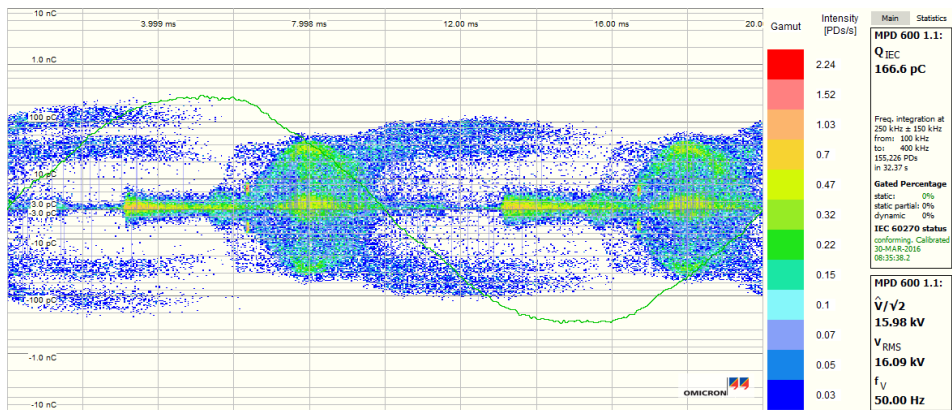
I dette tillegget presenteres PDMålinger ved forskjellige trykk rett etter tennspenning. Testobjektene er tørre. Grunnen til at spenningen som er oppgitt på figurene kan være lavere enn i tabell 4.3.1 er fordi spenningen måtte bli skrudd ned før bildene ble lagret for at det elektriske treet ikke skulle vokse til gjennomslag.



Figur B.0.1: PD etter tennspenning ved 20 bar, hentet fra serie 4.



Figur B.0.2: PD etter tennspenning ved 40 bar, henter fra serie 4



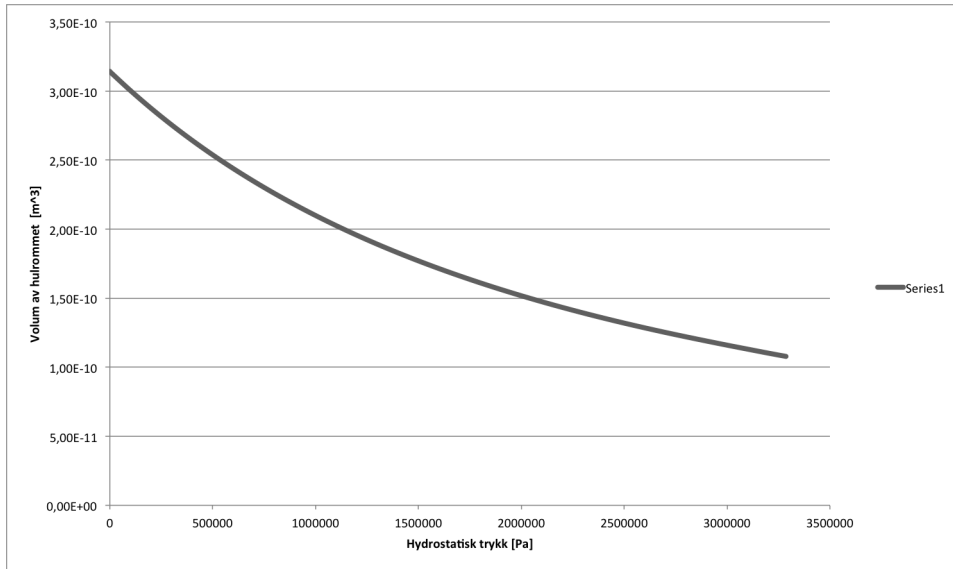
Figur B.0.3: PD etter tennspenning ved 80 bar, henter fra serie 3

Tillegg C

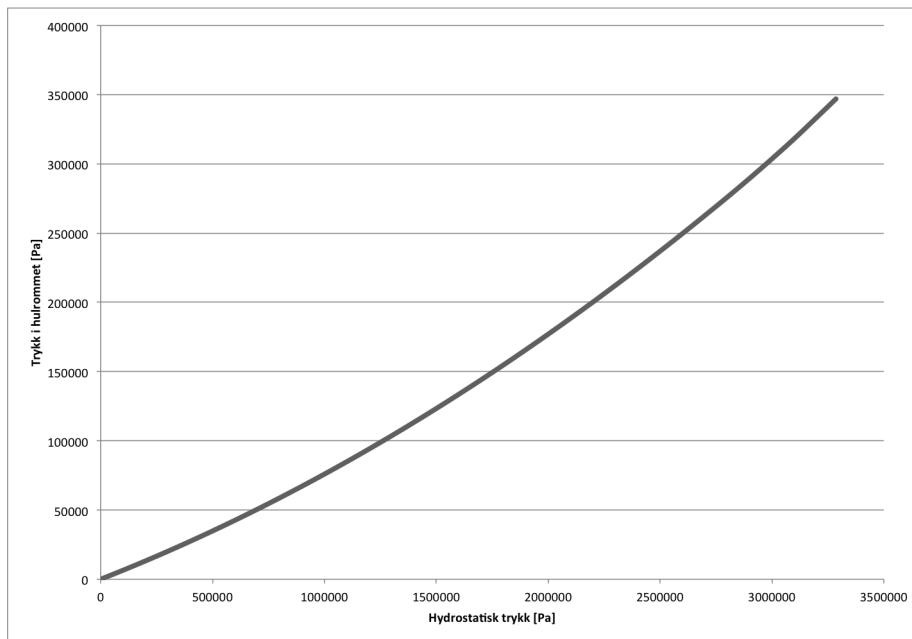
Svein Magne Hellesæ [33] ved SINTEF Energi AS lagde en modell i COMSOL basert på materialegenskaper til silikon og teorien nevnt i delkapittel 2.6. COMSOLmodellen har brukt E-modul er beregnet ut fra data målt av Vemund Mørk [34].

I modellen ble et sylindrisk hulrom modellert som en kanal i det elektriske treet. Det ble antatt at trykket innad i hulrommet var det eneste som holdt hulrommet sirkulært. Radiusen ble modellert til å være $3 \mu m$. For å beregne E-modulen ble det gjort en forenkling om at materialet var lineært. E-modulen ble beregnet til å være $3 \cdot 10^6$ [33].

Figur C.0.1 og C.0.2 er en grafisk fremstilling av datene som ble funnet i COMSOL.



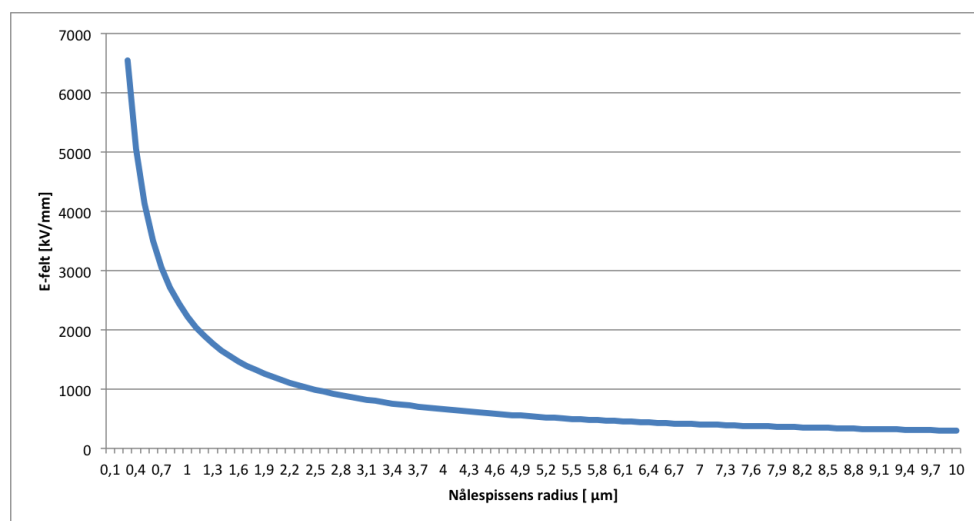
Figur C.0.1: Deformasjon av hulrom dersom det hydrostatiske trykket øker.



Figur C.0.2: Hvordan trykket i kanalene øker med økt hydrostatisk trykk.

Tillegg D

Bakgrunnsfeltet ved nålesepissen ble beregnet ut fra ligning 2.5.1 med en spenning på 10 kV og en avstand på 2 mm mellom jordelektroden og nålen. Grunnen til at 10 kV ble valgt, var at dette er spenningen som ble brukt for å få elektrisk trevekst i tørre testobjekter ved 1 bar, se delkapittel 3.5.



Figur D.0.1: Bakgrunnsfeltet ved tuppen av nålpissen som en funksjon av nålspissradiusen. Ligning 2.5.1 er brukt for å regne ut feltet. Spenningen er 10 kV og avstanden mellom elektrodene er 2 mm.

Radiusen til seks nåler ble målt. Radiusen til nålspissene varierte fra $2,5 \mu\text{m}$ til $3,4 \mu\text{m}$. Ved disse verdiene vil det ikke være store endringer i det elektriske feltet, se figur D.0.1. Selv om enkelte av nålene som ble brukt i denne oppgaven kan ha

vært noe større eller noe mindre enn de som ble studert med 500x forstørrelse, viser figur D.0.1 at det ikke vil være store endringer i bakgrunnsfeltet i området 2-4 μm . Derfor kan det konkluderes med at de forskjellene det eventuelt vil være på nålspissene ikke vil ha stor betydning for når elektrisk trevekst blir initiert fra nålspissen.