

PD-testing av høytemperatur motorkabel

Sylvi Brækken

Master i energibruk og energiplanlegging

Innlevert: juni 2017

Hovedveileder: Frank Mauseth, IEL

Medveileder: Sverre Hvidsten, SINTEF Energi
Jostein Bø Fløystad, SINTEF Energi

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Institutt for elkraftteknikk

Oppgavetekst

Dagens kryssbundne isolasjonssystemer for kabler “smelter” ved en temperatur på rundt $110\text{ }^{\circ}\text{C}$, noe som gir dagens konvensjonelle kraftkabler en maksimum driftstemperatur på $90\text{ }^{\circ}\text{C}$. Nylig har en ekstrudert fluoropolymer-kabel for medium spenning blitt kommersielt tilgjengelig med en maksimal driftstemperatur på $200\text{ }^{\circ}\text{C}$. Dette åpner for en del nye muligheter, som for eksempel høyere strømtetthet, subsea-applikasjoner osv.

Prosjektarbeidet er hovedsakelig eksperimentelt. En mellomspenningskabel, som i hovedsak blir brukt som motorkabel til neddykkbare elektriske pumper (Electrical submersible pumps, ESP), vil testes for partielle utladninger. Kabelens isolasjonsmateriale består av fluorisert etylenpropylen (FEP). Kabelen har ingen ytre halvleder og når kabelen legges i vann vil det derfor bli dannet luftbobler på overflaten av isolasjonsmaterialet. Ved spenningspåkjenning vil det derfor kunne oppstå partielle utladninger i luftbobler på overflaten av kabelen. Under type- og rutinetesting av kabelen vil det dermed oppstå en utfordring med å skille partielle utladninger i luftbobler fra eventuelle partielle utladninger i isolasjonsmaterialet.

Det skal utføres flere forsøk, blant annet der kabelen blir lagt i en blanding av vann og Tween 80 for å redusere overflatespenningen på vannet, og dermed fjerne luftboblene. Det vil også gjennomføres flere forskjellige forsøk der kabelen ligger i rent vann for å finne ut hvordan luftboblene påvirkes i forskjellige situasjoner.

Forord

Denne masteroppgaven har blitt utført ved Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet (NTNU), ved Institutt for Elkraftteknikk, våren 2017. Oppgaven er en videreføring av prosjektoppgaven utført høsten 2016. Arbeidet presentert i denne oppgaven er en del av et pågående forskningsprosjekt ved SINTEF Energi og NTNU.

Stor takk til mine veiledere, førsteamanuensis Frank Mauseth ved NTNU og seniorforsker Sverre Hvidsten ved SINTEF Energi for god veiledning og støtte gjennom perioden.

I tillegg vil jeg takke ingeniør Erik Bjerrehorn ved SINTEF Energi for opplæring i å lage termineringer. Takk til avdelingsingeniør Morten Flå ved Institutt for elkraftteknikk for å ha laget karet kabelen ligger i og flere andre deler til laboratorieoppsettet.

Takk til Karoline Skjelsvik for å ha hjulpet meg med stream-opptakene i OMICRON og MATLAB-script. Takk til August Brækken for å ha korrekturlest oppgaven. Til slutt vil jeg takke alle andre som har hjulpet meg og besvart spørsmål jeg har hatt i løpet av masterskrivingen.

Trondheim, 18. juni 2017

Sylvi Brækken

Sammendrag

Det er viktig å få testet kabler for partielle utladninger (PD), da partielle utladninger over tid kan skade kabelen og føre til gjennomslag.

Hovedfokuset i denne masteroppgaven har vært å PD-teste motorkabler uten ytre halvleder som i hovedsak blir brukt i neddykkbare elektriske pumper (electrical submersible pumps, ESP). Produsenter av denne typen kabler har problemer med å teste kablene for partielle utladninger, fordi kablene ligger i vann og det da oppstår partielle utladninger i luftbobler på overflaten av isolasjonsmaterialet.

Det er gjort forsøk der kabelen er lagt i vann tilsatt Tween 80, og forsøk der kabelen har ligget i rent vann. Ved å tilsette 10 % Tween 80 i vann, vil overflatespenningen reduseres så mye at det ikke dannes luftbobler på overflaten av isolasjonsmaterialet. Det vil ikke oppstå partielle utladninger i en frisk kabel dersom det ikke er noen luftbobler på kabelens overflate. Det er derfor lagt mest fokus på forsøk der kabelen har ligget i rent vann.

Det vil kun oppstå partielle utladninger i luftbobler på kabelens overflate når kabelen ligger i rent vann dersom det er surret en metalltråd rundt kabelen.

I forsøk der luftboblene ble fjernet, og det deretter ble initiert luftbobler manuelt med en sprøyte, har det vist seg at det trengs mange luftbobler for at det skal registreres partielle utladninger. 11 luftbobler gir ikke utladninger, mens 300 luftbobler gir utladninger. Tennspenningen varierer fordi systemet er dynamisk, men i 4 av 5 forsøk der det ble lagt på 300 luftbobler var tennspenningen 12.5 kV.

Antall partielle utladninger og utladningenes størrelse reduseres ved en konstant spenning på 20 kV i 2 timer. Dette er fordi mange luftbobler sprekker opp eller beveger seg slik at de ikke lenger blir påvirket av den påtrykte spenningen.

Luftbobler sprekker ofte opp ved at to nærliggende luftbobler går sammen og deretter sprekker opp. Større luftbobler sprekker ofte opp uten å gå sammen med en nærliggende luftboble. At luftbobler beveger seg, går sammen og sprekker opp er observert også før det oppstår partielle utladninger. Når mange nok luftbobler påvirkes av den påtrykte spenningen, vil det oppstå partielle utladninger.

COMSOL Multiphysics ble brukt for å modellere laboratorieforsøkene. Det har vist seg at det elektriske feltet vil være høyere i en luftboble med større kontaktareal mot kabelen enn en luftboble med et lite kontaktareal mot kabelen. Spenningen i et område på 0.1 mm ble regnet ut til å være 100 V i en luftboble med diameter 2 mm, der luftboblen var en halvkule.

Abstract

It is important to test cables for partial discharges (PD), because partial discharges can damage the insulation material, and over time lead to a breakdown.

The main objective of this master thesis has been to test motor cables without an outer semiconductor for partial discharges. The cable is primarily used in electrical submersible pumps (ESP). Producers of this type of cable have problems testing the cables for partial discharges because the cables are placed in water, and partial discharges will occur in air bubbles on the surface of the insulation material.

Tests have been conducted where the cable was placed in water containing Tween 80, and where the cable was placed in water. By adding 10 % Tween 80 to the water, the surface tension will be reduced to such a degree that no air bubbles will form on the surface of the insulation material. The main focus of this master thesis has been experiments where the cable is placed in water, due to the fact that no PD occurs in a healthy cable, if there are no air bubbles on the cable surface.

Partial discharges will only occur in air bubbles on the surface of the cable when the cable is placed in water if a metal wire is wrapped around the cable.

In experiments where the air bubbles were removed, and new air bubbles were initiated with a syringe, it has been shown that many air bubbles are needed for partial discharges to be registered. 11 air bubbles will not give partial discharges, while 300 bubbles will give partial discharges. The inception voltage (PDIV) varies because the system is dynamic, but in 4 out of 5 tests with 300 air bubbles, the inception voltage was 12.5 kV.

Both the number of partial discharges and the size of the discharges are reduced at a constant voltage of 20 kV for 2 hours. This is due to the fact that many of the air bubbles will burst or move so that they will no longer be affected by the applied voltage.

Two air bubbles that are close to each other will often go together and then burst. Bigger air bubbles will often burst without joining another bubble. Air bubbles moving, joining together and bursting has been observed before partial discharges occur. When enough air bubbles are affected by the applied voltage, partial discharges will occur.

COMSOL Multiphysics has been used to model the laboratory experiments. It has been shown that the electric field is higher in an air bubble with a larger area in contact with the cable, than an air bubble with a smaller contact area. The voltage in an area of 0.1 mm was calculated to 100 V in an air bubble with a diameter of 2 mm, where the air bubble was a half sphere.

Innhold

Sammendrag	iii
Abstract	iv
1 Introduksjon	1
2 Teori	2
2.1 Materialelegenskaper	2
2.1.1 Teflon FEP	2
2.2 Partielle utladninger	3
2.2.1 Hulromsutladninger	4
2.2.2 Overflatespenning	5
2.2.2.1 Overflatespenning FEP	6
2.2.3 Elektrisk måling av partielle utladninger	7
2.2.4 Tenn- og slukkespenning	7
3 Eksperimentelt	8
3.1 Forberedelser	8
3.1.1 Terminering av kabler	8
3.1.2 Isolasjonsmaterialets overflatespenning ved vasking med vann og isopropanol	9
3.2 Eksperimentelt oppsett	10
3.3 Prosedyre	11
3.3.1 Måling av partielle utladninger	11
3.3.2 OMICRON og MATLAB	13
3.4 COMSOL Multiphysics	14
4 Resultat og diskusjon	17
4.1 Resultat av forberedelser	17
4.1.1 Test av termineringer	17
4.1.2 Resultat fra overflatespenningstest	18
4.2 Måling av partielle utladninger	20
4.2.1 Resultater fra PD-måling med kabel i vann tilsatt 10 % Tween 80	20
4.2.2 Resultater fra PD-måling med kabel i vann	22
4.2.3 Kabel i vann med metalltråd	23
4.2.3.1 Kondisjonering av kabel	23
4.2.3.2 24-timers målinger	26
4.2.3.3 Initiering av én luftboble	26
4.2.3.3.1 Mellom metalltrådene	26

4.2.3.3.2	Under metalltråder	27
4.2.3.4	Varighetstest med luftbobler under tråd	28
4.2.3.5	Initiering av 300 bobler	29
4.3	Elektrisk felt - COMSOL Multiphysics	32
5	Konklusjon	35
6	Videre arbeid	36
A	Vedlegg A - Utstyrliste	i
B	Vedlegg B - COMSOL	ii
B.1	Elektrisk felt	ii
B.2	Luftboble ved og under metalltråd	iii
C	Vedlegg C - Datablad EPO-TEK E4110	iv
D	Vedlegg D - PD-plott fra 24-timers forsøk	v
D.1	Forsøk 1	v
D.2	Forsøk 2	vi

Nomenklatur

a	Kapasitans i resten av testobjektet [F]
b	Kapasitans i isolasjonsmaterialet i serie med hulrommet [F]
c	Kapasitans i hulrommet [F]
E	Elektrisk felt [$\frac{V}{m}$]
E_h	Maksimalt elektrisk felt i et sfærisk hulrom [$\frac{V}{m}$]
U	Spenning [V]
U_{r0}	Restspenning [V]
U_{s0}	Startspenning [V]
V_l	Molart volum av dråpen [$\frac{m^3}{mol}$]
V_s	Molart volum av materialet dråpen ligger på [$\frac{m^3}{mol}$]
q_i	Ladning [$\frac{C}{m}$]

Greske symboler

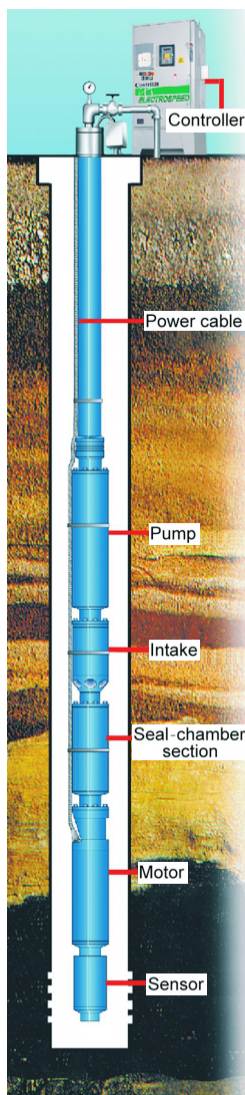
γ_l	Overflatespenningen til en væske [$\frac{N}{m}$]
γ_s	Overflatespenningen til et fast stoff [$\frac{N}{m}$]
ϵ_r	Relativ permittivitet (dielektrisk konstant)
θ	Kontaktvinkel [°]
Φ	Interaksjonsparameter

Forkortelser

ESP	Neddykkbare elektriske pumper (electrical submersible pumps)
FEP	Fluorisert etylenpropylen
PD	Partielle utladninger (Partial discharges)
PDIV	Tennspenning (Inception voltage)
PDEV	Slukkespenning (Extinction voltage)

1 Introduksjon

Neddykkbare elektriske pumper (electrical submersible pumps, ESP) brukes til å pumpe opp moderate til store mengder væske fra borehull [1]. En motorkabel uten ytre halvleder er koblet til statorviklingen i motoren som driver pumpen. Siden motoren og kabelen ligger i vann kan det bli dannet luftbobler på overflaten av isolasjonsmaterialet til kabelen. I Figur 1.1 kan en se et ESP-system.



Figur 1.1:
ESP-system [1]

Fluorisert etylenpropylen (FEP) er et av isolasjonsmaterialene som blir brukt i slike kabler. FEPs mange spesielle egenskaper gjør at kabler med FEP som isolasjonsmateriale tåler å bli utsatt for høye temperaturer og et tøft miljø. Med en smeltetemperatur på $260\text{ }^{\circ}\text{C}$ kan kabler med FEP-isolasjon kjøres med en driftstemperatur på opptil $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ [2]. Dette gjør det mulig å øke strømføringen i kabelen uten å øke tverrsnittet. Dette gir både økonomiske og miljømessige besparelser.

FEP-isolasjon brukes også i romfartsindustrien. NASA har utført forsøk med blant annet FEP som isolasjonsmateriale. I romfartsindustrien trengs det isolasjonsmateriale som tåler det tøffe miljøet i verdensrommet, men som også har lav vekt og gode elektriske egenskaper [3].

I denne masteroppgaven har en FEP-kabel uten ytre halvleder blitt testet for partielle utladninger (PD). Man er i utgangspunktet interessert i å teste motorkabelen for partielle utladninger i isolasjonsmaterialet. Dette kan være vanskelig fordi kabelen ligger i vann og det da dannes luftbobler på kabelens overflate. Ved PD-testing kan det derfor være usikkert om de partielle utladningene er i isolasjonsmaterialet, i termineringene, eller i luftbobler på overflaten av isolasjonsmaterialet.

Partielle utladninger i et isolasjonsmateriale kan oppstå på grunn av forurensninger. I prosjektoppgaven ble det sett på FEP-granulat i mikroskop for å sortere granulat med forurensninger fra granulat uten. I videre arbeid kan det være interessant å lage testobjekter med og uten forurensninger for å kunne sammenligne utladningsmønsteret ved PD i isolasjonsmaterialet med utladningsmønsteret ved PD i luftbobler.

2 Teori

2.1 Materialelegenskaper

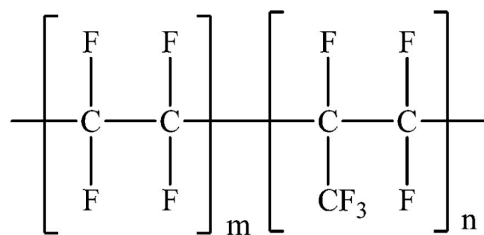
2.1.1 Teflon FEP

Fluorisert etylenpropylen (FEP) er en fluorplast som kan brukes som isolasjonsmateriale i høyspenningskabler. FEP ble oppfunnet av DuPont og selges under handelsnavnet Teflon FEP [2]. FEPs kjemiske struktur er illustrert i Figur 2.1.

FEP har egenskaper som gjør at det egner seg for mange forskjellige anvendelsesområder. I tillegg til å ha mange av de samme fysiske, kjemiske og elektriske egenskapene som polytetrafluoreten (PTFE), er FEP i tillegg ekstruderbart. FEP har en smeltetemperatur på 260 °C [2]. Kabler med FEP som isolasjonsmateriale kan ha en driftstemperatur på 200 °C, noe som er mye høyere enn dagens isolasjonsmateriale i kabler [2]. Kabler med PEX-isolasjon tåler som regel en kontinuerlig driftstemperatur på 90 °C [4].

FEP har en veldig lav tapsfaktor (dissipation factor) og dielektrisk konstant (eller relativ permittivitet). FEPs tapsfaktor ved 25 °C, og 100 Hz til 1 MHz, er 0.002-0.007 [5]. FEP har en dielektrisk konstant på 2.05 [2].

FEP er gjennomsiktig, noe som gjør det lettere å observere luftbobler på overflaten, og å se eventuelle forurensninger i isolasjonsmaterialet.



Figur 2.1: Kjemisk struktur for FEP, der C står for karbon, F står for fluor og CF₃ står for trifluormetyl [6]

2.2 Partielle utladninger

Partielle utladninger (Partial discharges, PD) er elektriske utladninger som går over små deler av isolasjonen mellom to elektroder, uten å føre til umiddelbart gjennomslag.

Partielle utladninger oppstår når det elektriske feltet er større enn holdfastheten til den aktuelle delen av isolasjonen [7].

I tillegg til at det elektriske feltet må være høyt nok, må det også være et startelektron til stede. Startelektronet blir akselerert av det elektriske feltet, og dette starter et lokalt elektrisk kred i områder med forhøyet feltstyrke [8].

Partielle utladninger måles i coulomb [C], ofte i størrelsesorden picocoulomb [pC] (10^{-12} C). Utladningene utvikles veldig raskt, og etter brøkdeler av et mikrosekund [μ s] vil hulrommet være isolerende igjen [9].

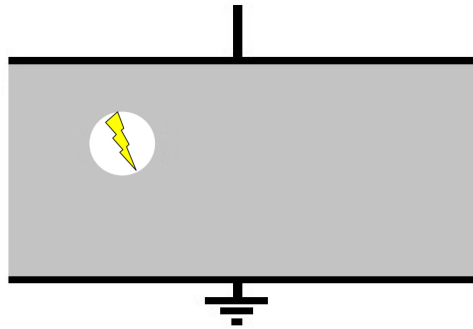
Partielle utladninger kan blant annet oppstå i hulrom i isolasjonsmaterialet og rundt spisse kanter (koronautladninger). Koronautladninger oppstår i områder der det elektriske feltet er så sterkt at den omliggende gassen ioniseres [10]. For å unngå eller redusere koronautladninger, kan man bruke koronaringer eller lignende til å jevne ut det elektriske feltet. Kun hulromsutladninger beskrives nærmere, da dette er mest relevant for oppgaven.

Partielle utladninger kan skade isolasjonsmaterialet, og over tid føre til elektrisk tre-dannelse, som igjen kan føre til gjennomslag.

2.2.1 Hulromsutladninger

Hulromsutladninger er partielle utladninger i hulrom, for eksempel inne i et isolasjonsmateriale, som vist i Figur 2.2. Hulrommet kan være fylt av en gass eller en væske. Hulromsutladninger vil ligge på spenningsens stigende flanker [8].

Hulromsutladninger oppstår fordi gassen eller væsken i hulrommet har lavere holdfasthet enn isolasjonsmaterialet rundt. Dersom det elektriske feltet blir større enn holdfastheten til hulrommet vil det føre til partielle utladninger.



Figur 2.2: Prinsippskisse av hulromsutladninger inne i et isolasjonsmateriale. Dersom det elektriske feltet er større enn holdfastheten til hulrommet vil det oppstå partielle utladninger i hulrommet

I et sfærisk hulrom vil det maksimale elektriske feltet bli [9]:

$$E_h = \frac{3 \cdot \varepsilon_r}{1 + 2\varepsilon_r} \cdot E \quad (2.1)$$

der E er det elektriske feltet i isolasjonsmaterialet og ε_r er isolasjonsmaterialets relative dielektriske konstant. Det elektriske feltet i hulrommet er maksimalt 1.5 ganger det elektriske feltet i isolasjonsmaterialet [9].

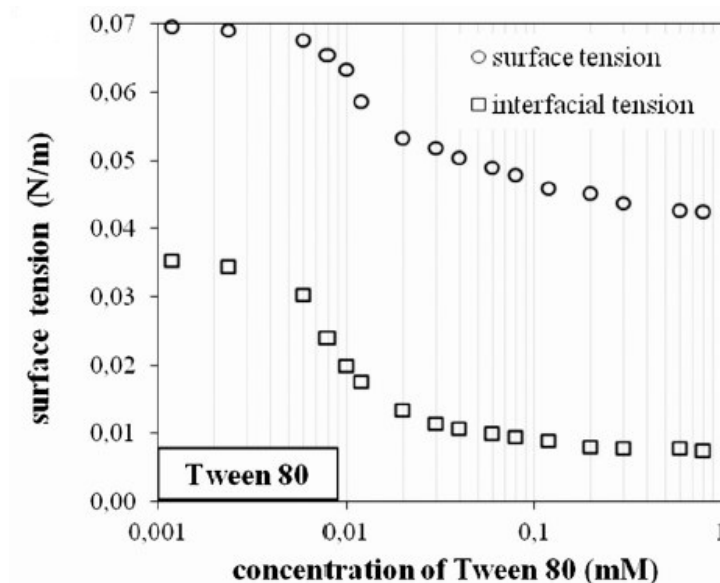
I denne oppgaven er det luftbobler på overflaten av isolasjonsmaterialet som er av interesse. Det resulterende elektriske feltet i luftboblene på overflaten av kabelen avhenger av hvordan boblene ligger på kabelen. Dersom en luftboble såvidt har kontakt med kabelen, vil det elektriske feltet i luftboblen være svært lite, da den er omringet av vann med høy dielektrisk konstant. Men dersom en luftboble har stor overflate i kontakt med kabelen vil feltet i boblen bli stort, og det vil da lettere oppstå partielle utladninger i boblen. Den dielektriske konstanten er 80 for vann (ved 20 °C) [11], 2.05 for FEP [2] og 1 for luft [12].

2.2.2 Overflatespenning

For å fjerne luftboblene fra isolasjonsmaterialet, må overflatespenningen reduseres. Overflatespenning er kohesjonskrefter ved overflaten av en væske, for eksempel vann. Inne i væsken vil molekylene tiltrekkes likt fra alle kanter, mens i overflaten av væsken vil molekylene kun bli tiltrukket av molekylene under og ved siden av. Denne nettokraften blir kalt overflatespenning [13].

Dersom et objekt ligger i vann og overflatespenningen på vannet er for høy, kan det bli liggende luftbobler på overflaten av objektet. For å unngå dette må overflatespenningen reduseres. Dette kan gjøres ved å tilsette en surfaktant. En surfaktant er et stoff som reduserer overflatespenningen (mellom en væske og en gass) eller grenseflatespenningen (mellom en væske og en væske, eller en væske og et fast stoff) [14].

Tween 80 er en viskøs ikke-ionisk surfaktant. Som en ser ut fra Figur 2.3, vil overflatespenningen reduseres ved en økning i konsentrasjon av Tween 80 i vann.



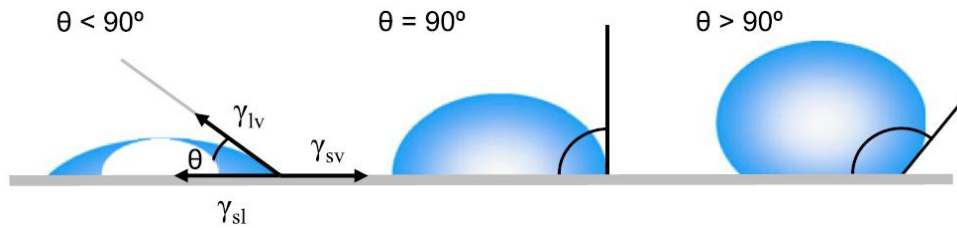
Figur 2.3: Overflatespenning i forhold til konsentrasjon av Tween 80. M er molar konsentrasjon $[\frac{mol}{L}]$ [15]

Vann har en dielektrisk konstant på 80 (ved 20 °C) [11], og Tween 80 har også en dielektrisk konstant på 80. Ved tilsetning av Tween 80 i vann vil ikke den dielektriske konstanten forandres, og det elektriske feltet vil ikke bli påvirket.

10 % Tween 80 i vann tilsvarer $0.0809 \frac{mol}{L}$, noe som gir en overflatespenning på $0.048 \frac{N}{m}$. Det ble brukt en blanding med 10 % Tween 80, da grafen i Figur 2.3 ble misforstått i prosjektoppgaven, og væsken med vann og Tween 80 som ble brukt her ble laget til prosjektoppgaven.

2.2.2.1 Overflatespenning FEP

Fukting (eng. wettability) er studiet som beskriver kontakten mellom en væske og et fast stoff. Væskens kontaktvinkel mot det faste stoffet indikerer hvor god eller dårlig fukting væsken har mot det faste stoffet. En kontaktvinkel på over 90° tilsvarer en høy fuktingssevne, mens en kontaktvinkel på under 90° tilsvarer en lav fuktingsevne [16]. Kontaktvinkelen avhenger av både væsken og det faste stoffet.



Figur 2.4: Illustrasjon av kontaktvinkel θ ved ulike dråper liggende på en homogen fast overflate. Kontaktvinkelen avhenger av overflatespenningen til væsken og overflatespenningen til materialet dråpen ligger på [16]

Vinkelen θ er kontaktvinkelen til for eksempel en vanddråpe, se Figur 2.4. Kontaktvinkelen er avhengig av hvilken væske som brukes og væskens overflatespenning γ_l , overflatespenningen til materialet γ_s , og en interaksjonsparameter Φ . Kontaktvinkelen kan regnes ut ved hjelp av [17]:

$$\theta = \cos^{-1}\left(\sqrt{\frac{\gamma_s}{\gamma_l} \cdot 4\Phi^2} - 1\right) \quad (2.2)$$

der Φ er:

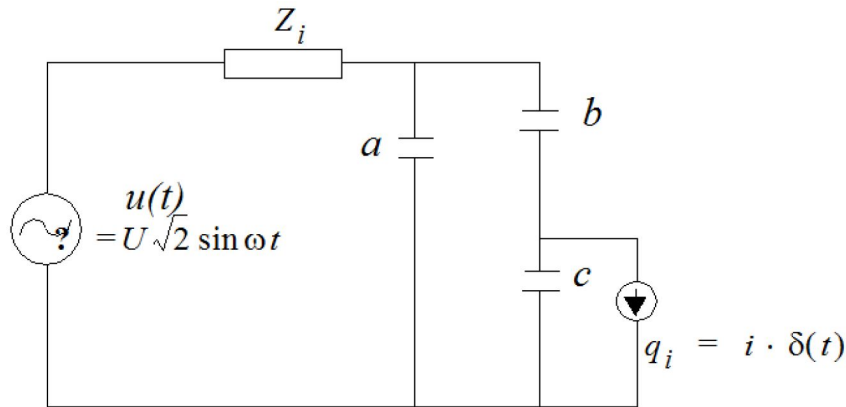
$$\Phi = \frac{4(V_s V_l)^{\frac{1}{3}}}{(V_s^{\frac{1}{3}} + V_l^{\frac{1}{3}})^2} \quad (2.3)$$

V_s er molart volum $[\frac{m^3}{mol}]$ av materialet dråpen ligger på, V_l er molart volum $[\frac{m^3}{mol}]$ av dråpen.

Dersom det er snakk om vanddråper som ligger på en flat overflate, og kontaktvinkelen til vanddråpen endrer seg etter vasking av overflaten, vil det si at overflatespenningen til materialet har endret seg. Dette kan man se ut ifra ligning 2.2, der alle størrelser er konstante, med unntak av overflatespenningen til materialet.

2.2.3 Elektrisk måling av partielle utladninger

Figur 2.5 viser en forenklet krets hvor det er antatt at det er partielle utladninger i kun ett hulrom i et testobjekt. c representerer kapasitansen i hulrommet, b kapasitansen i isolasjonsmaterialet i serie med hulrommet, og a kapasitansen i resten av testobjektet.



Figur 2.5: Prinsippskisse av hulromsutladninger. c , b og a er kapasitansen i henholdsvis hulrommet, isolasjonsmaterialet i serie med hulrommet, og resten av testobjektet [9]

Når en partiell utladning oppstår i et hulrom, vil spenningen over hulrommet gå fra startspenningen U_{s0} til en restspenning U_{r0} . Dette tilsvarer en innskyting av en ladning q_i over c , slik at spenningtapet over c er $\Delta U = U_{s0} - U_{r0}$ [9].

2.2.4 Tenn- og slukkespenning

Tennspenning (Partial discharge inception voltage, PDIV) er spenningsnivået som gir kritisk spenning over et hulrom, altså det laveste spenningsnivået hvor partielle utladninger oppstår [8]. Tennspenningen finnes ved å gradvis øke spenningen over testobjektet til det oppstår partielle utladninger.

Slukkespenning (Partial discharge extinction voltage, PDEV) er spenningsnivået hvor partielle utladninger slutter å oppstå. Slukkespenningen finnes ved å gradvis minke spenningen over testobjektet til de partielle utladningene slutter å oppstå.

Tennspenningen vil være høyere enn slukkespenningen [18].

3 Eksperimentelt

3.1 Forberedelser

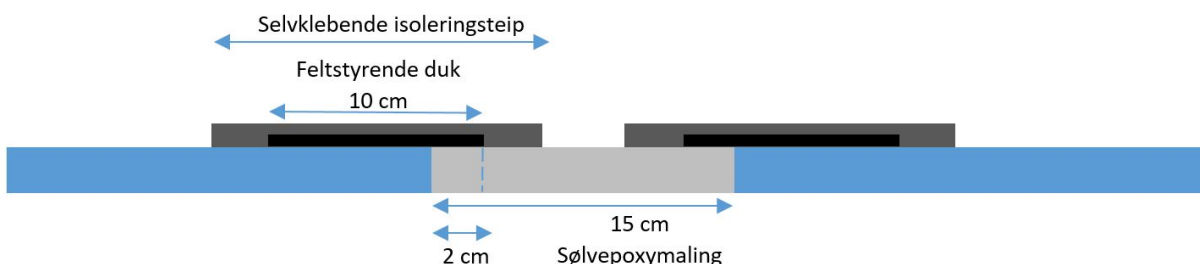
3.1.1 Terminering av kabler

Det ble laget to forskjellige typer testobjekter. Først ble to kabler preparert for å teste at termineringene var gode nok. Termineringene bør tåle opptil 35 kV. Etter testing av disse kabelene ble det laget et hovedtestobjekt som ble brukt gjennom masteroppgaven. Nedenfor er det beskrevet hvordan kabelene ble terminert.

Kablene ble malt med sølvepoxymaling av typen EPO-TEK E4110. For å bedre heften mellom sølvepoxymalingen og isolasjonsmaterialet ble kabelene først pusset med sandpapir. Sølvepoxyen ble laget ved å blande del A (en sølvpasta) med del B (en herdevæske), se datablad i Vedlegg C. Det ble brukt elektriker-teip for å få en rett kant mellom pusset og malt isolasjonsmateriale, og ubehandlet isolasjonsmateriale. Kabelene ble lagt i varmeskap ved 63 °C i 18 timer for at malingen skulle tørke.

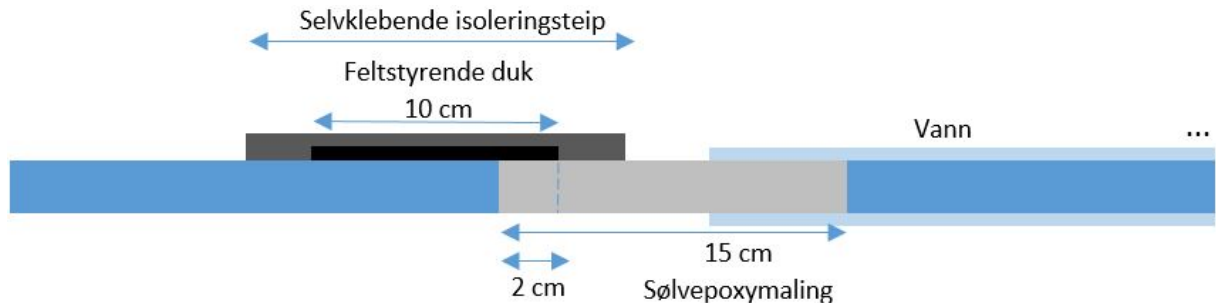
Etter at sølvepoxymalingen hadde tørket, ble kabelen terminert. En feltstyrende duk (**ABB 2GPJ 51060062 FSD PAD**) ble lagt på rundt kabelen slik at den dekket ca 2 cm av sølvepoxymalingen. Duken bør legges så tett som mulig på kabelen for å unngå hulrom. Utenpå den feltstyrende duken ble det surret tre runder med selvklebende isoleringsteip. Enden av isoleringsteipen ble til slutt festet med elektriker-teip.

Testkablene for test av termineringene har sølvepoxymaling mellom termineringene, se Figur 3.1.



Figur 3.1: Prinsippskisse av kabel for test av termineringer. Sølvepoxymalingen mellom termineringene gjør at det kun er termineringene som blir testet for partielle utladninger

Hovedtestobjektet har i underkant av 1 meter mellom områdene med sølvepoxymaling. Det er dette området av kabelen som vil ligge i et kar fylt med rent vann eller vann tilsatt Tween 80. Figur 3.2 viser hvordan termineringene ligger på hovedtestobjektet.



Figur 3.2: Prinsippskisse av terminering av kabel i vann. Skissen viser en halv kabel, og det er en tilsvarende terminering på den andre siden av vannet. Testområdet som ligger i vann er ca 1 m

Etter at første del av prosedyren var gjennomført, ble det surret en metalltråd rundt kabelen.

3.1.2 Isolasjonsmaterialets overflatespenning ved vasking med vann og isopropanol

De første forsøkene ble gjennomført med vann tilsatt 10 % Tween 80. Når det skulle byttes væske til rent vann måtte karet og kabelen vaskes. Det ble utført et lite forsøk for å finne ut om isopropanol påvirker overflatespenningen til kabelen. Dette ble gjort ved å kutte av en liten bit av en lik kabel. Litt av isolasjonsmaterialet ble skåret av på bunnen for at kabelbiten skulle ligge stabilt. På samme måte ble det skåret av litt materiale på toppen slik at vanndråper lettere kunne ligge på kabeloverflaten.

Ved hjelp av en Hamilton MICROLITER Syringe ble en liten vanndråpe lagt på kabelens overflate. Deretter ble kabelbiten vasket med vann, og en ny vanndråpe ble lagt på kabelen. Til slutt ble kabelbiten vasket med isopropanol, og en tredje vanndråpe ble lagt på. Det ble tatt bilder av vanndråpene ved hjelp av et digitalt mikroskop av typen Keyence VHX-500K.

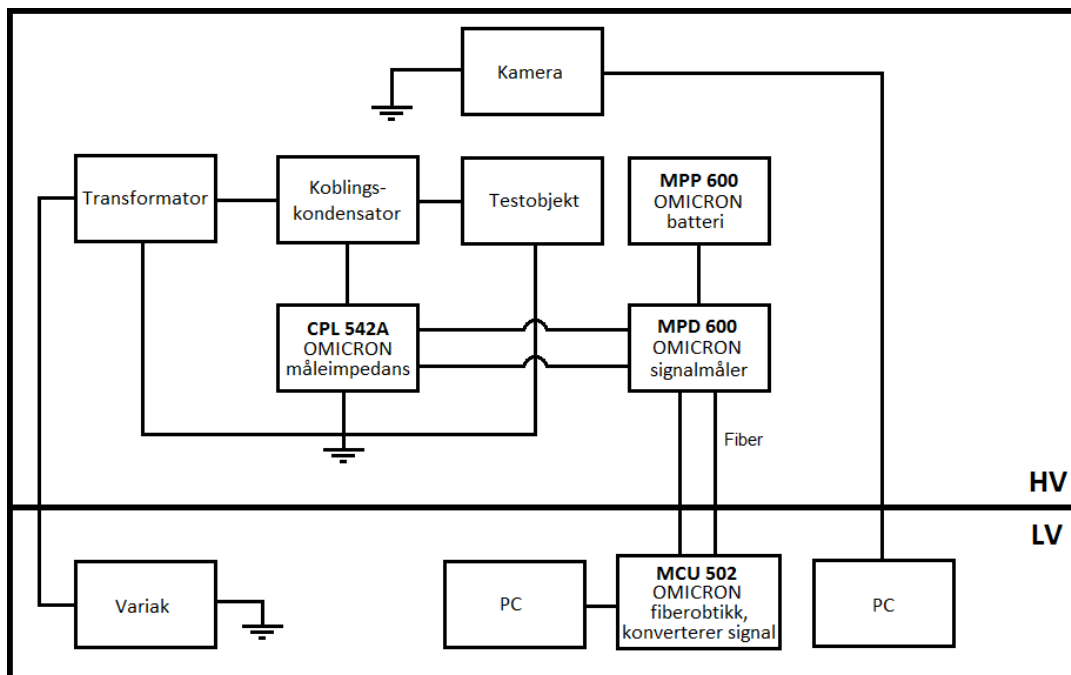
Vanndråpene ble deretter sammenlignet, før vasking av karet ble gjennomført.

3.2 Eksperimentelt oppsett

Hovedtestobjektet ble koblet til en koblingskondensator i den ene enden, og en koronaring ble festet i den andre enden. Dette ble gjort ved å skru inn en skrue i lederen på hver side av kabelen. Det ble lagt en halvkule av metall over festet mellom kabelen og koblingskondensatoren. Koronaringen og denne halvkulen har som mål å fjerne spisse kanter, og dermed unngå koronautladninger. Koblingskondensatoren ble koblet til en transformator ved hjelp av en metallstang. Transformatoren ble koblet til en variak som sto utenfor cellen, altså på lavspentsiden. Koblingskondensatoren ble også koblet til OMICRON-utstyr, som brukes til måling av partielle utladninger. Over testobjektet ble det satt opp et speilreflekskamera som ble brukt til å ta bilder av eller filme luftbobler på overflaten av kabelen.

Testobjektet ble lagt i et kar fylt med rent vann eller vann tilsatt 10 % Tween 80. Objektet ble jordet ved å knyte en jordingstråd rundt kabelen, slik at vannet som omringet kabelen ble jordet. Kameraet, kamerastativet og variaken ble også jordet ved hjelp av jordingstråder. Alle komponenter benyttet på laboratoriet er listet i Vedlegg A.

Figur 3.3 viser en skjematisk oversikt over oppsettet på laboratoriet.



Figur 3.3: Skjematisk fremstilling av oppsettet på laboratoriet. Ved hjelp av OMICRON-utstyr måles PD-aktivitet i testobjektet. Testobjektet er koblet til en koblingskondensator, som igjen er koblet til en transformator. Spenningen inn til transformatoren justeres ved hjelp av en variak. Et speilreflekskamera brukes til å ta bilder av testobjektet. Kameraet og PD-målingene styres ved hjelp av PC'er på lavspentsiden. HV - høyspentside (inne i cellen), LV - lavspentside (utenfor cellen)

3.3 Prosedyre

3.3.1 Måling av partielle utladninger

1. Det ble laget kabler som skulle brukes til å teste at termineringene tåler opptil 35 kV. Disse kablene ble malt med sølvepoxy fra terminering til terminering, og de ble testet i luft.

Følgende prosedyre ble fulgt ved måling av PD-aktivitet når hovedtestkabelen lå i vann tilsatt 10 % Tween 80 og når kabelen lå i rent vann:

1. Boblenes bevegelse ble undersøkt med og uten påtrykt spenning.
 - (a) Tennspenning ble funnet med 1 luftboble festet til kabelen. Dette ble gjort 15 ganger for å finne et forhold mellom størrelsen på luftboblen og spenningen det oppsto partielle utladninger ved (ev. spenningen boblen sprakk ved). Spenningen ble økt med 250 V hvert minutt, med en startspenning på 500 V.
 - (b) Det ble filmet spenningsoppkjøring med 1 luftboble festet til kabelen. Det ble undersøkt om luftboblen sprakk opp ved spenningsoppkjøring eller ved stabil spenning.
 - (c) Fem luftbobler ble lagt på kabelen, og det ble undersøkt om de beveget seg eller sprakk opp uten påtrykt spenning over 2 timer.
2. En metalltråd ble surret rundt kabelen. Dette ble gjort da det ikke oppsto partielle utladninger uten metalltråden. Følgende forsøk ble utført med kabel liggende i rent vann:
 - (a) Spenningen ble kjørt opp fra 500 V til 30 kV, med en økning på 500 V hvert minutt. Dette ble gjort 4 ganger. Stream-funksjonen i OMICRON ble brukt når det oppsto partielle utladninger.
 - (b) Spenningen ble kjørt opp til 20 kV, og deretter ble det foretatt målinger på 1 time i 24 timer, med 5 sekunder pause mellom målingene. Stream-funksjonen ble brukt ved første og siste måling. Dette ble gjort 2 ganger for å sjekke reproduserbarhet.
 - (c) En luftboble ble lagt på kabelens overflate, først mellom metalltrådene, og deretter under en metalltråd. Forsøket ble utført 3 ganger per posisjon, til sammen 6 forsøk. Spenningen ble kjørt opp fra 500 V til 30 kV, med en økning på 500 V hvert minutt. Stream-funksjonen ble benyttet ved partielle utladninger.
 - (d) Varighetstest med spenning på 20 kV. 3 bobler ble lagt under to tråder, 6 bobler totalt. Det ble utført PD-målinger på 30 min, med 30 min pause mellom

målingene. Forsøket skulle stå på i 6 dager, med bruk av stream-funksjonen ved første og siste måling.

- (e) 300 luftbobler ble lagt på kabelens overflate, og spenningen ble kjørt trinnvis opp til 20 kV med en endring på 2.5 kV. Spenningen på 20 kV sto på i 2 timer for å se om PD-aktiviteten endret seg over tid. Det ble filmet og tatt bilder av testobjektet under spenningsoppkjøringen. Det ble også tatt bilder hvert minutt gjennom de 2 timene forsøket varte.

Hver gang det ble fylt oppi nytt vann, ble kabelen kondisjonert ved å kjøre spenningen opp fra 500 V til 30 kV, med en endring på 500 V. Dette ble gjort for å fjerne luftbobler som blir påvirket av den påtrykte spenningen.

For å finne størrelsen på luftboblene som ble lagt på kabelen, ble bilder av luftboblene sammenlignet med bilder av en linjal plassert så tett på kabelen som mulig. Linjalen måler ned til en halv millimeter. Det er store relative usikkerheter ved måling av luftboblens størrelse. Relativ usikkerhet vil si prosentvis usikkerhet.

Støy

Måling av partielle utladninger er sensitive målinger, og det vil derfor ofte oppstå støysignaler. Støygrensen (eng. Threshold) var ved test av termineringer satt til ± 0.8 pC (pico = 10^{-12}), men ble justert opp til 1.9 pC ved test av hovedtestobjektet.

Støysignaler er ikke spenningsavhengig, og kan derfor være der gjennom et helt forsøk fra før spenningen er satt på til forsøkets slutt. Støysignaler kan også oppstå innenfor en tidsperiode på noen sekunder. Ved hjelp av stream-funksjonen i OMICRON, kan støysignaler skilles ut og fjernes.

Metallpartikler som ligger på gulvet kan gi støy. Trebukkene som kabelen ligger på er satt sammen med metallskruer, noe som gjerne skulle vært unngått for å redusere støyen mest mulig.

Det som er antatt å ha gitt mest støy er forsøk i nærliggende laboratorieceller og kjøring av traverskranen. Kjøring av traverskran gir så mye støy at det er ikke noen vits i å kjøre PD-forsøk dersom kranen brukes.

PD-aktivitet under 10 pC er ansett som lave verdier og derfor tillatt ¹.

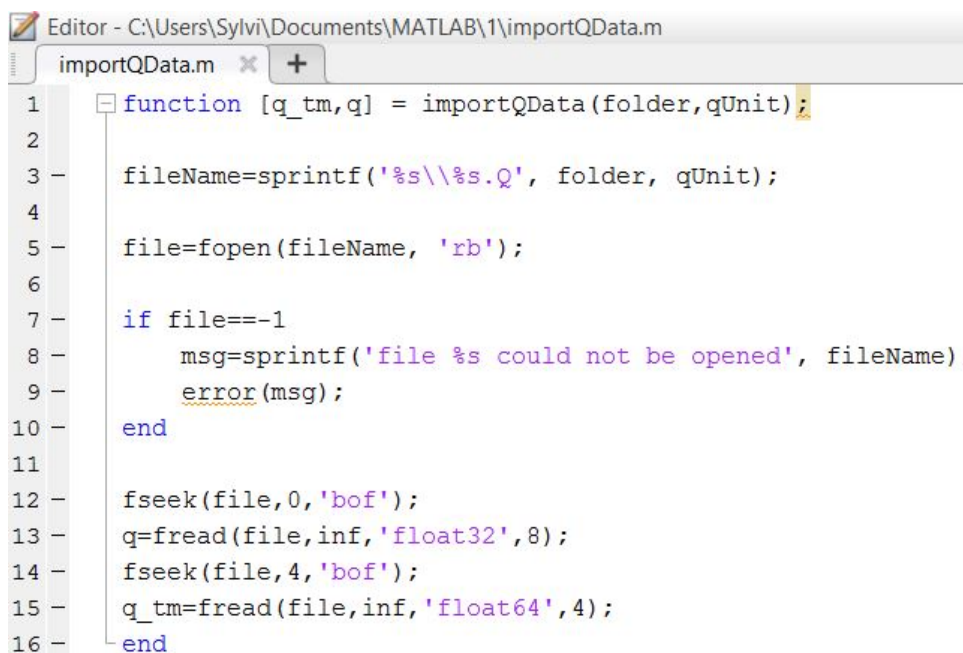
¹Muntlig kommunikasjon med Sverre Hvidsten, mai 2017

3.3.2 OMICRON og MATLAB

Stream-funksjonen i OMICRON ble brukt i flere forsøk. Ved å åpne en stream-fil i OMICRON kan man spille den av og få ut to MATLAB-kompatible filer. Filene inneholder informasjon om ladning og spenning. I denne oppgaven ble det kun sett på ladningsverdiene til de partielle utladningene.

I Replay-fanen i OMICRON ble det krysset av for “Export Matlab-compatible files”. Deretter ble det valgt hvor filene skulle lagres, før stream-filen ble spilt av.

Neste steg var å skrive inn følgende script i MATLAB, se Figur 3.4.

The image shows a screenshot of a MATLAB editor window. The title bar reads "Editor - C:\Users\Sylvi\Documents\MATLAB\1\importQData.m". The window contains a script with the following code:

```
1 function [q_tm,q] = importQData(folder,qUnit);
2
3     fileName=sprintf('%s\\%s.Q', folder, qUnit);
4
5     file=fopen(fileName, 'rb');
6
7     if file==-1
8         msg=sprintf('file %s could not be opened', fileName);
9         error(msg);
10    end
11
12    fseek(file,0,'bof');
13    q=fread(file,inf,'float32',8);
14    fseek(file,4,'bof');
15    q_tm=fread(file,inf,'float64',4);
16    end
```

Figur 3.4: Script brukt til å få ut størrelsen på de partielle utladningene [19]

Til slutt ble kommandoen i Figur 3.5 skrevet inn i MATLABs kommandovindu.

```
[q_tm,q]=importQData('C:\Users\Sylvi\Documents\MATLAB\1','unit1.1');
```

Figur 3.5: Kommando brukt for å få ut ladningsverdiene [19]

Det er viktig at filene fra OMICRON ligger i mappen man refererer til i MATLABs kommandovindu.

Ved å skrive inn denne kommandoen får man ut verdiene til de partielle ladningene. Disse verdiene kan brukes til å lage grafer i MATLAB eller Excel. I denne oppgaven ble Excel brukt.

3.4 COMSOL Multiphysics

COMSOL Multiphysics er et modelleringsverktøy som kan brukes til å modellere laboratorie-forsøk. I denne oppgaven ble COMSOL brukt til å modellere det elektriske feltet som oppstår i isolasjonsmaterialet og i luftboblen ved en gitt påtrykt spenning. Det ble modellert med metalltråd surret rundt kabelen, slik som det ble gjort i andre del av laboratorie-forsøkene.

Dette ble modellert ved å utføre følgende prosedyre:

For å lage modellen ble det først valgt Model Wizard. Deretter ble det valgt Space Dimension: 3D, Physics: ACDC - Electrostatics (es) og Study: Stationary.

Hver del av modellen ble lagt til ved å trykke på Geometry på verktøylinjen, og deretter ble det valgt hvilken form delen skulle ha.

For å bygge modellen brukt i denne oppgaven ble følgende deler lagt til:

- Lederen → Cylinder med radius 0.425 cm og høyde 2 cm.
- Isolasjonen → Cylinder med radius 0.7 cm og høyde 2 cm.
- Vanntank → Block med bredde 2 cm, dybde 2 cm og høyde 2 cm.
- Luftboble → Sphere med radius 0.1 cm.
- Metalltråder → Torus med ytre radius 0.75 cm og indre radius 0.025 cm.

For å gjøre modellen enklest mulig ble det kun modellert én luftboble. Luftboblen ble plassert midt mellom to metalltråder.

Etter at geometriene var lagt inn, ble det lagt til definisjoner for å vise hvilke deler av modellen som er leder, isolasjon, luftboble, “terminal boundaries” og “ground boundaries”. Det ytterste laget av lederen ble valgt til å være “terminal boundaries”, og det ytterste laget av isolasjonen og luftboblens overflate ble valgt til å være “ground boundaries”.

Deretter ble det lagt inn hvilke materialer som finnes i modellen, før de forskjellige delene ble tilegnet et material.

Siste steg før man får ut resultater var å legge inn “electrostatics (es)” og å bygge et mesh. Meshet ble bygget ved å velge “Build all” under Mesh 1 under Model builder.

Til slutt ble resultatene funnet ved å gå til Results i verktøylinjen og klikke på Global Evaluation. Deretter ble uttrykket i øverste del av Expressions section i innstillinger byttet ut med es.C11 - Capacitance, før det ble trykket Evaluate.

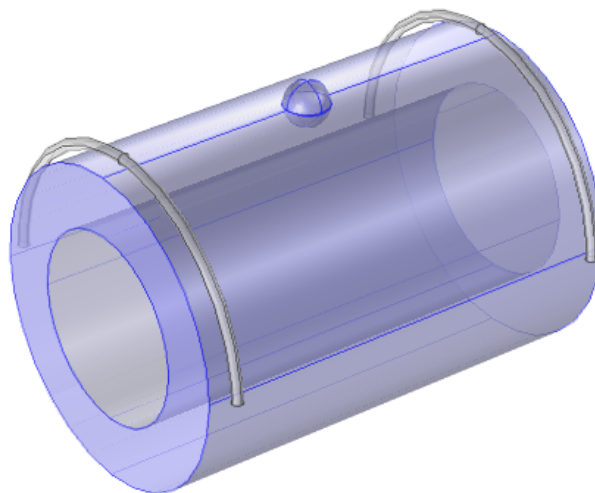
For å få ut det elektriske feltet i isolasjonsmaterialet og luftboblen, ble det trykket Results i verktøylinjen og deretter 2D Plot Group. Deretter ble det høyreklikket på 2D Plot Group 1 i Model Builder og Surface ble valgt.

Ved å høyreklikke Data Sets under Model Builder og velge Cut Plane, kan man lage et nytt snitt i modellen. Under Settings i Cut Plane ble det valgt Study 1/Solution 1 (sol1) som Data Set. Det ble valgt hvilket plan og hvor i planet det skulle kuttet.

Deretter ble det lagt til Surface ved å høyreklikke på 2D Plot Group. Under Settings i Surface ble "Cut Plane 1" valgt som Data Set. Under Expression ble det lagt til $es.normE$ - Electric field norm og under Unit ble det skrevet inn kV/mm.

Etter det ble valgt farger til å illustrere styrken på det elektriske feltet, ble det trykket plot.

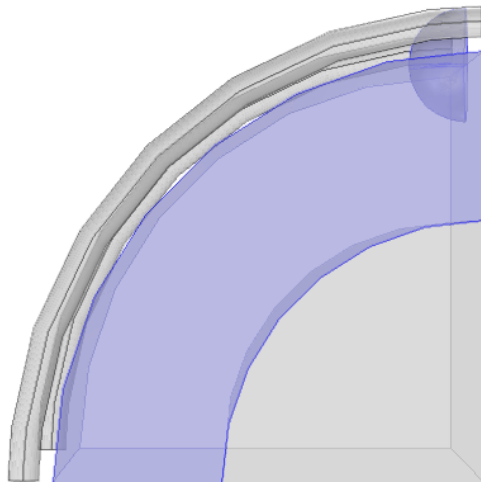
For å gjøre det enklest mulig ble metalltrådene lagt på slik som i Figur 3.6.



Figur 3.6: Skisse av modellen i COMSOL før uinteressante deler ble kuttet bort. De grå sylindrerne rundt kabelen representerer metalltrådene surret rundt kabelen i laboratorieforsøkene

For å gjøre modelleringstiden kortere, ble modellen forenklet ved å kutte bort deler som ikke var av interesse. Ettersom det er det elektriske feltet i luftboblen som er interessant, og det er laget en 3D-modell, kunne en god del av modellen fjernes. Dette ble gjort ved å legge til en "Block" på den delen man ville fjerne, og deretter bruke "Difference"-funksjonen.

Etter at dette ble gjort, så modellen ut som i Figur 3.7.



Figur 3.7: Skisse av modellen i COMSOL etter at uinteressante deler ble kuttet bort

Det ble også modellert tre ytterligere forsøk med én luftboble 0.5 mm fra en metalltråd, én luftboble under en metalltråd og uten metalltråd.

4 Resultat og diskusjon

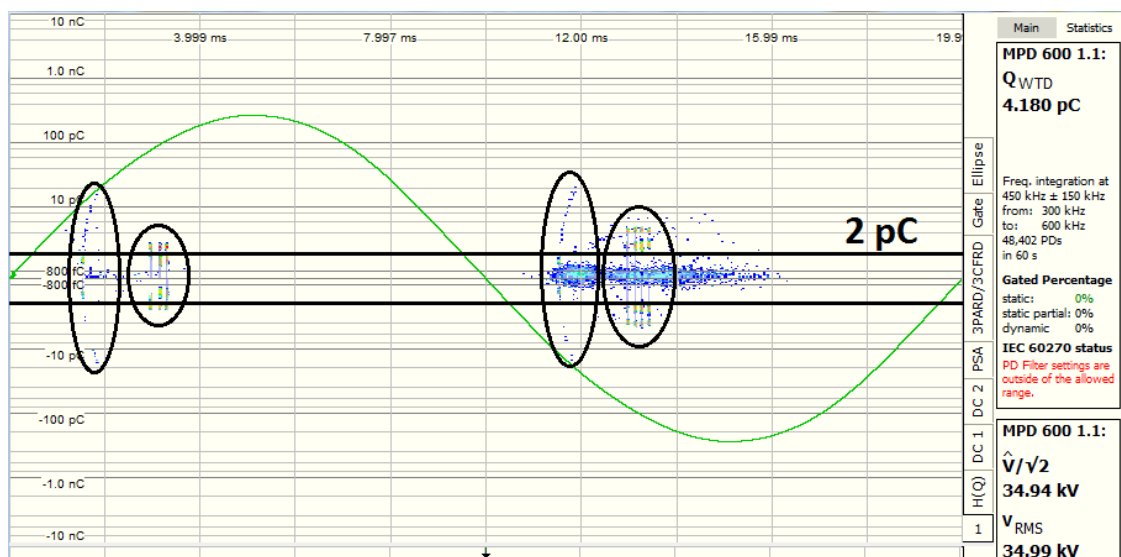
4.1 Resultat av forberedelser

4.1.1 Test av termineringer

Det ble kjørt forsøk for å teste at termineringene tåler opptil 35 kV. Det ble laget 2 testkabler for test av termineringer, og disse ble testet ved å kjøre opp spenningen trinnvis fra 2.5 kV til 35 kV, med en endring på 2.5 kV.

Det er viktig å få testet termineringene for å være sikker på at det ikke vil oppstå partielle utladninger i termineringene ved senere forsøk. Begge testkablene tålte opptil 35 kV. En kan da ved senere forsøk kjøre spenningen opp til 20-25 kV og være sikker på at det ikke er utladninger i termineringene.

I Figur 4.1 kan en se utladningsmønsteret ved 35 kV ved test av den ene testkabelen. To testkabler ble testet to ganger hver med like resultater som i Figur 4.1. Alle utladningene i PD-plottet er støy. Utladningene i de markerte områdene er støy som var der fra start. Hvis støygrensen hadde vært satt til ± 1.9 pC, ville det vært svært få utladninger i PD-plottet. ± 2 pC er markert i Figur 4.1 for å vise hvor mye av støyen som er innenfor dette området.



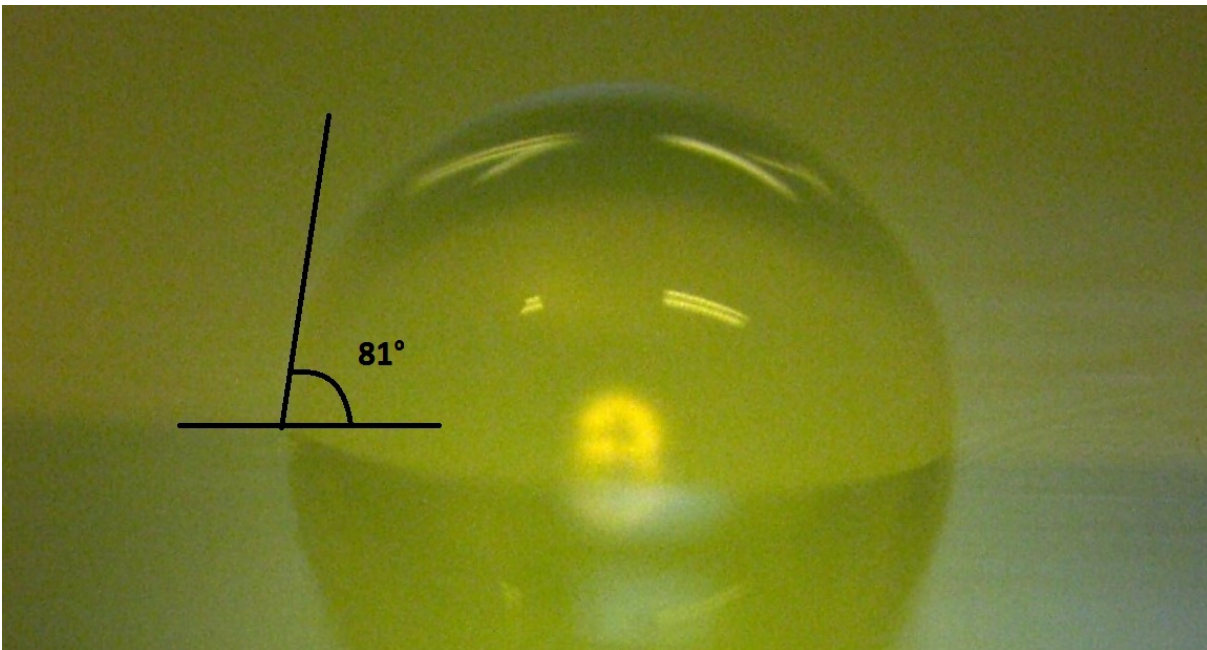
Figur 4.1: Partielle utladninger ved 35 kV ved test av termineringer. Utladningene i PD-plottet er støy

4.1.2 Resultat fra overflatespenningstest

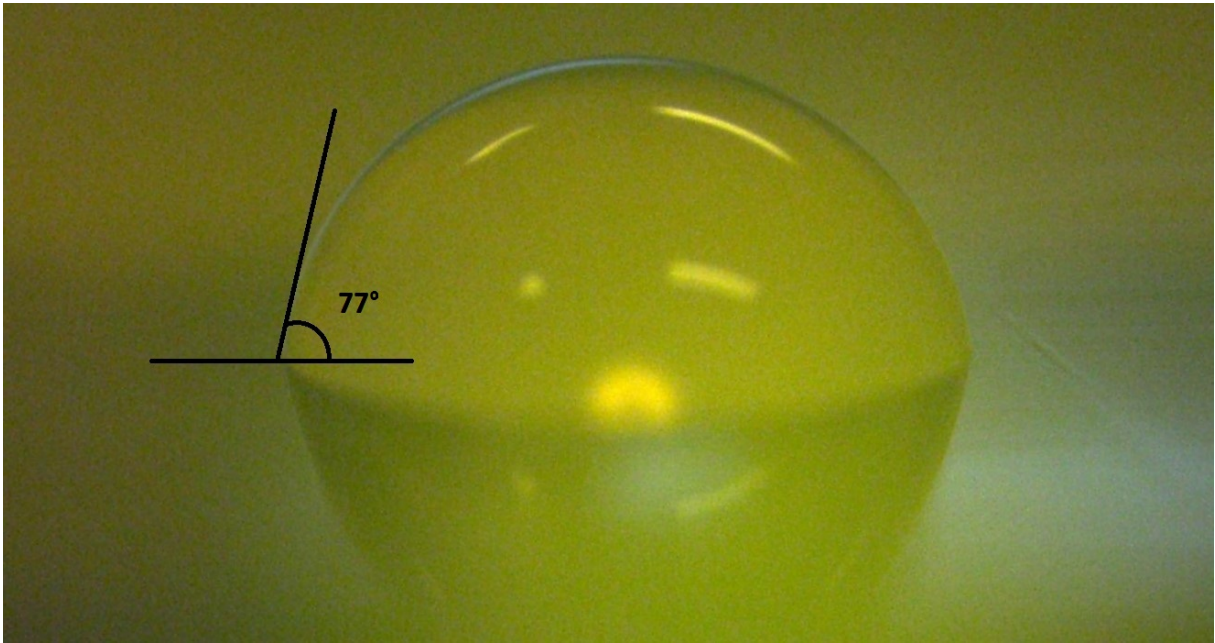
Det ble utført et lite forsøk for å finne ut om isopropanol påvirker overflatespenningen til kabelen. Dersom man sammenligner formen på vanndråpene (kontaktvinkelen til dråpene), kan man se om overflatespenningen til kabelen blir påvirket av forskjellige væsker.

Kontaktvinkelen til dråpen ble redusert fra 81° til 77° etter vasking med vann, se Figur 4.2 og 4.3. En reduksjon i kontaktvinkelen vil si at overflaten har fått en høyere overflatespenning. Kabelbiten ble deretter vasket med isopropanol. Dråpens kontaktvinkel mot overflaten ble ikke endret etter vasking med isopropanol, se Figur 4.3 og 4.4. Ettersom kabelen skulle ligge i vann, og det ikke var store forskjeller i dråpens kontaktvinkel etter vasking med isopropanol og vann, ble det valgt å vaske kabelen og karet med isopropanol.

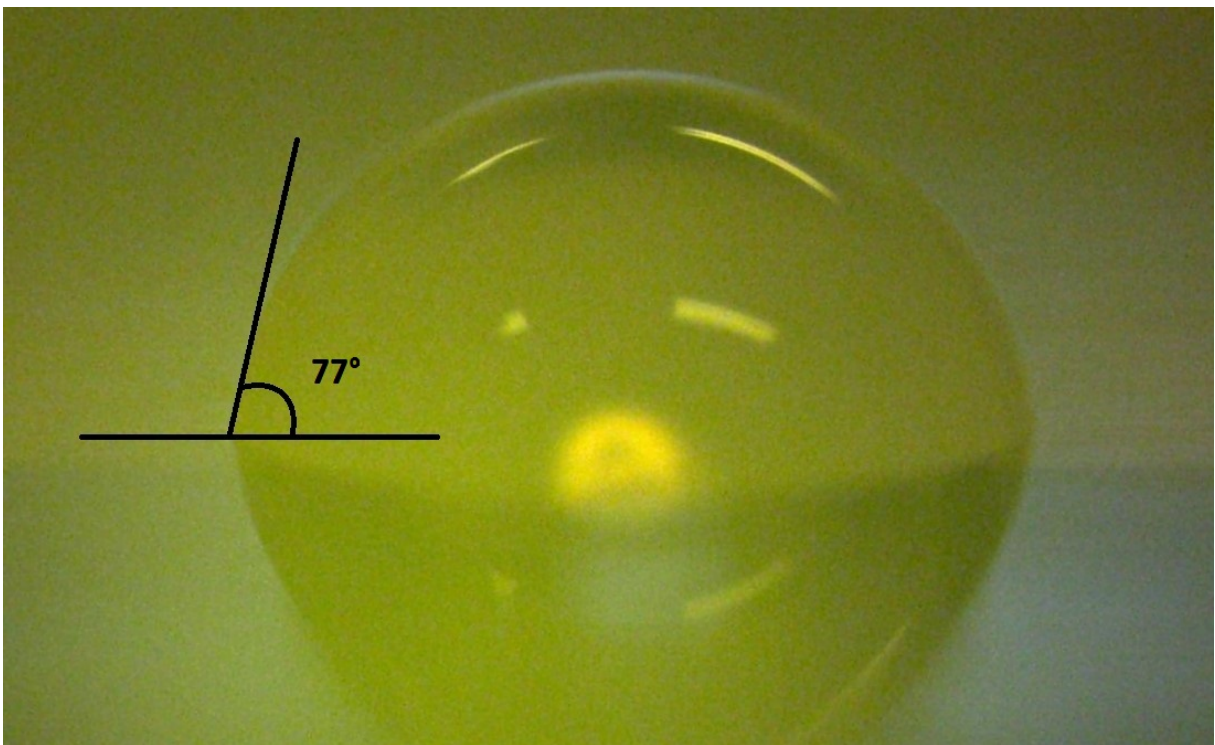
Ved å bruke isopropanol, vil en lettere få bort alle rester av Tween 80.



Figur 4.2: Vanndråpe på flat kabeloverflate etter at kabelbiten har ligget i vann tilsatt 10 % Tween 80. Kontaktvinkelen til vanndråpen er 81°



Figur 4.3: Vanndråpe på flat kabeloverflate etter at kabelbiten har ligget i vann tilsatt 10 % Tween 80 og deretter har blitt vasket med vann. Kontaktvinkelen til dråpen er 77°



Figur 4.4: Vanndråpe på flat kabeloverflate etter at kabelbiten er vasket med vann og deretter isopropanol etter å ha ligget i vann tilsatt 10 % Tween 80. Kontaktvinkelen til dråpen er 77°

4.2 Måling av partielle utladninger

4.2.1 Resultater fra PD-måling med kabel i vann tilsatt 10 % Tween 80

En luftboble ble lagt på kabelens overflate. Planen var å finne tennspenningen til luftboblen ved å kjøre spenningen trinnvis opp fra 500 V. Spenningen ble kjørt opp fra 500 V med en endring på 250 V til luftboblen sprakk. Det oppsto ikke PD i luftboblen, men den ble likevel påvirket av den påtrykte spenningen og sprakk opp.

Tabell 4.1 viser en oversikt over forholdet mellom luftboblens størrelse og hvilken spenning luftboblen sprakk opp ved når kabelen lå i vann tilsatt 10 % Tween 80.

Tabell 4.1: Forhold mellom luftboblens størrelse og spenningen boblen sprakk opp ved

Spenningsnivå luftboblen sprakk opp ved [kV]	Luftboblens størrelse [mm]
1.5	2.2
2.5	2.1
3.0	2.0
4.25	1.75
4.25	2.0
4.25	2.5
5.5	2.0
5.75	1.5
6.5	1.75
7.75	2.2
11.0	1.9
11.25	1.25
11.25	1.75
17.0	1.6
aldri	1.75

Det ble ikke registrert utladninger før luftboblen sprakk eller når den sprakk. Dette kan skyldes at det trengs flere enn én luftboble for å kunne registrere partielle utladninger.

Det ble også utført to like forsøk som over, der testobjektet ble filmet i stedet for at det ble tatt bilder. Luftboblene løsnet fra overflaten av kabelen ved henholdsvis 21 kV og 4.25 kV, og de ble liggende i overflaten av vannet. Luftboblene løsnet ved stabil spenning, ikke ved spenningsoppkjøring.

Grunnen til at luftboblene ble liggende i overflaten av væsken kan være at vannet er tilsatt 10 % Tween 80, noe som gjør at overflatespenningen blir redusert og luftboblene holder seg bedre.

Til slutt ble det utført et forsøk der fem luftbobler ble initiert på kabelens overflate for å se om de beveget seg eller sprakk opp uten påtrykt spenning. Dette forsøket ble utført over 2 timer. En av luftboblene beveget seg noe, og det ser også ut til at luftboblene ble mindre over tid, se Figur 4.5. Det er usikkert hvorfor luftboblene blir mindre. Ingen av luftboblene hadde sprukket opp etter 2 timer. Dersom forsøket hadde vart lenger, kan det hende at luftboblene hadde sprukket opp på grunn av oppdrift.



Figur 4.5: Luftbobler på overflaten av kabel liggende i vann tilsatt 10 % Tween 80. Bilde tatt ved start er lagt oppå bilde tatt etter 2 timer uten påtrykt spenning. Luftboblene ser ut til å ha blitt mindre over tid

4.2.2 Resultater fra PD-måling med kabel i vann

Først ble kabelen kondisjonert ved å kjøre spenningen trinnvis opp til 25 kV, med en endring på 250 V. Deretter ble det lagt en luftboble på kabelens overflate. Planen var å finne tennspenningen til luftboblen ved å kjøre spenningen sakte opp fra 500 V. Spenningen ble kjørt opp trinnvis fra 500 V med en endring på 250 V til luftboblen sprakk. Det oppsto ikke PD i luftboblen, men den ble likevel påvirket av den påtrykte spenningen og sprakk opp.

Tabell 4.2 viser en oversikt over forholdet mellom luftboblens størrelse og hvilken spenning boblen sprakk opp ved når kabelen lå i rent vann.

Tabell 4.2: Forhold mellom luftboblens størrelse og spenningen boblen sprakk opp ved

Spenningsnivå luftboblen sprakk opp ved [kV]	Luftboblens størrelse [mm]
2.25	3.0
3.25	2.7
7.75	2.9
8.0	3.2
8.5	2.5
10.75	2.5
11.0	3.3
11.5	2.5
13.0	2.5
13.5	2.5
19.5	2.7
21.0	3.0
21.5	3.25
22.75	2.6
aldri	2.9

Som i forrige forsøk ble det heller ikke her registrert utladninger før luftboblen sprakk eller når den sprakk. Også i dette forsøket kan det skyldes at det trengs flere enn én luftboble for å kunne registrere partielle utladninger.

Luftboblene som sprakk opp ble ikke liggende i overflaten av vannet slik som i forsøkene utført med vann tilsatt 10 % Tween 80. Dette er nok på grunn av at overflatespenningen til vannet er for lav til at luftboblen klarer å holde formen sin etter at den har løsnet fra overflaten av kabelen.

Til slutt ble det også her gjennomført et forsøk hvor 5 luftbobler ble lagt på kabelens overflate for å se om de beveget seg eller sprakk opp uten påtrykt spenning. Forsøket ble utført over 2 timer. En av luftboblene endret form, men det var svært liten forskjell.

4.2.3 Kabel i vann med metalltråd

Ettersom forsøkene utført uten metalltråd rundt kabelen ikke ga partielle utladninger, ble det utført forsøk med metalltråd. Følgende forsøk ble utført:

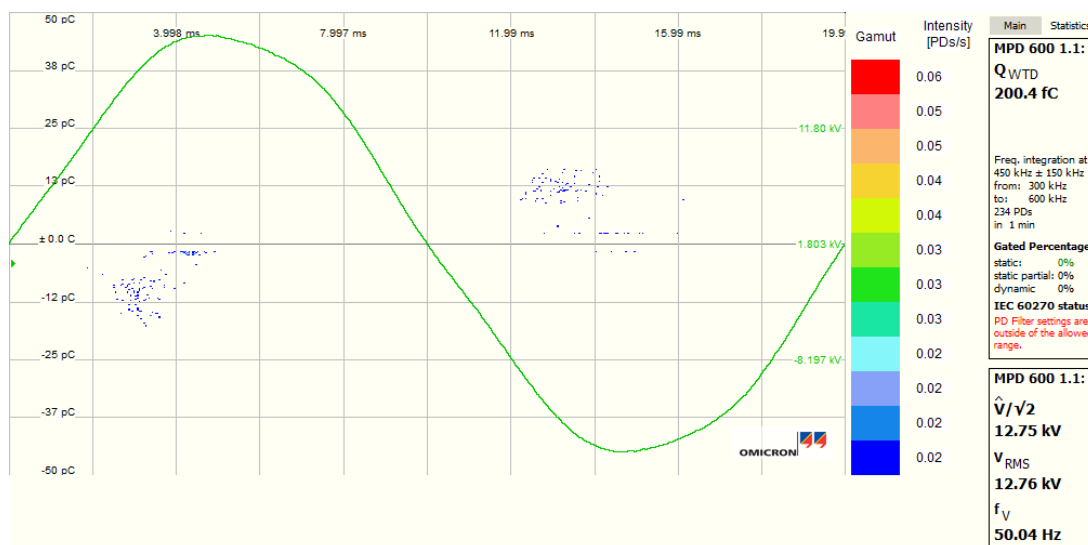
4.2.3.1 Kondisjonering av kabel

Spenningen ble kjørt opp trinnvis fra 500 V til 30 kV, med en økning på 500 V. Forsøket ble utført 4 ganger. Formålet med dette forsøket var å fjerne luftbobler som blir påvirket av den påtrykte spenningen. Påvirket betyr i denne sammenhengen at det oppstår partielle utladninger i luftboblene.

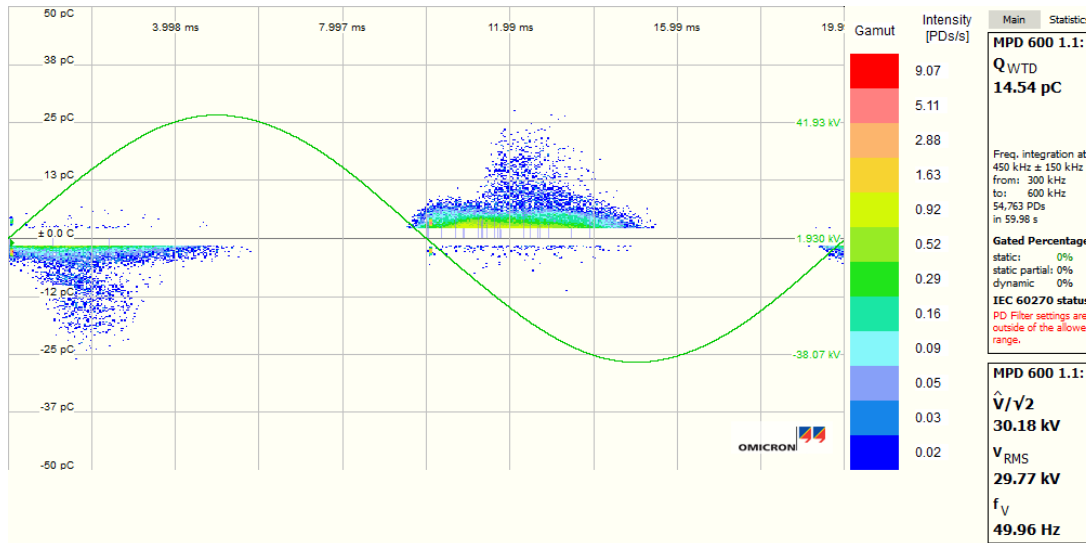
PD oppsto fra 12.75 kV, men økte i antall og intensitet ved økning i spenningsnivå. Ved 12.75 kV var det kun 234 partielle utladninger, og ved 14.25 kV hadde antallet utladninger økt til 4108. Ved 29.75 kV oppsto det høyeste antallet partielle utladninger, 54 763 partielle utladninger i løpet av 1 min, se Figur 4.7.

Det sluttet ikke å oppstå partielle utladninger i luftboblene i løpet av dette forsøket. Forsøket hadde en varighet på 1.5 timer. Dersom forsøket hadde vart lenger, kan det hende at de partielle utladningene hadde blitt redusert over tid på grunn av at de aktuelle luftboblene hadde sprukket opp.

Som en kan se i Figur 4.6, er sinuskurven noe ujevn. Dette kan påvirke utladningsmønsteret, og burde derfor vært unngått. Problemet kom og gikk, og forsøkene ble ikke avbrutt på grunn av en ujevn sinuskurve.



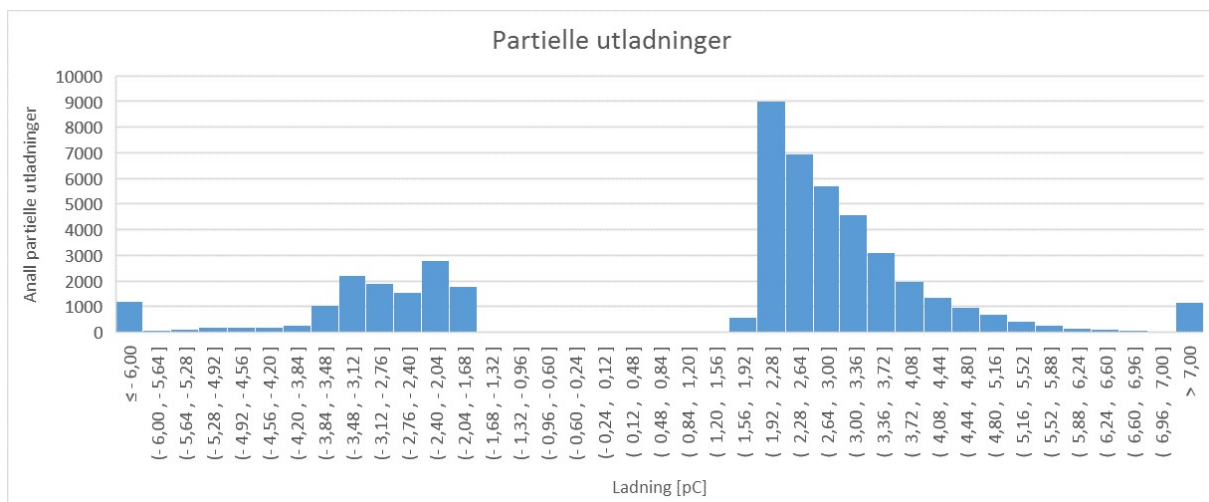
Figur 4.6: Tennspenning ved et av forsøkene hvor det ble lagt på 300 luftbobler. Sinuskurven er litt ujevn, noe som kan påvirke utladningsmønsteret



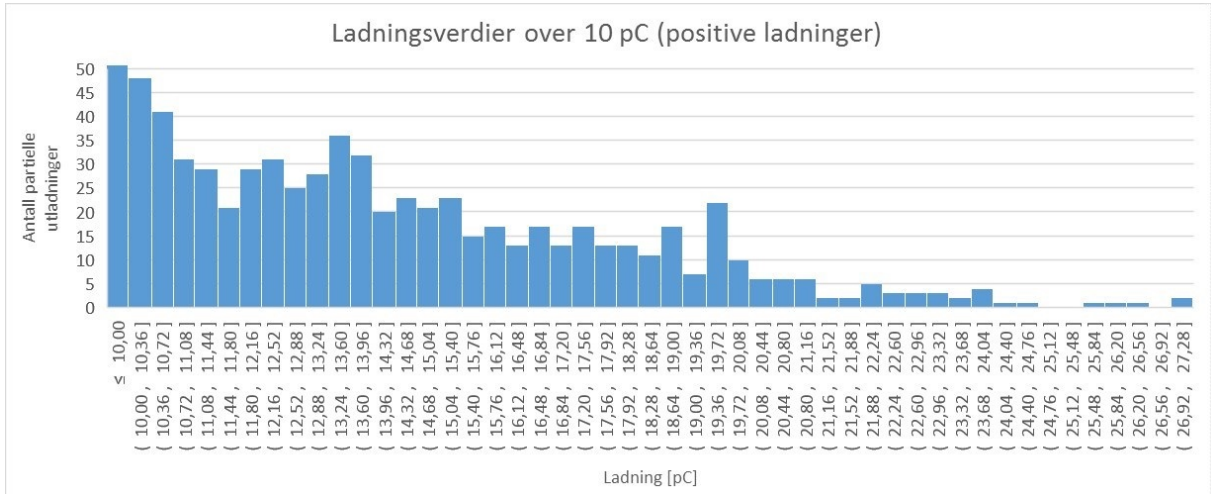
Figur 4.7: PD-plott ved maks antall partielle utladninger. Maks antall partielle utladninger i løpet av 1 min var i dette forsøket 54 763 og oppsto ved 29.75 kV

I Figur 4.8 vises antall partielle utladninger ved forskjellige ladningsnivå. Grafen er laget ved hjelp av stream-funksjonen i OMICRON og er ved maks antall partielle utladninger, hvor PD-plottet er vist i Figur 4.7.

I Figur 4.9 er ladninger over 10 pC skilt ut da partielle utladninger med lavere verdi anses som tillatt. En kan se at en god del utladninger har ladning høyere enn 10 pC, men at antallet synker med høyere ladning. Hvis man sammenligner antallet utladninger over 10 pC med antallet utladninger med lavere ladningsverdi (for eksempel 2-6 pC), ser man at det er en veldig liten del av utladningene som har høye verdier.

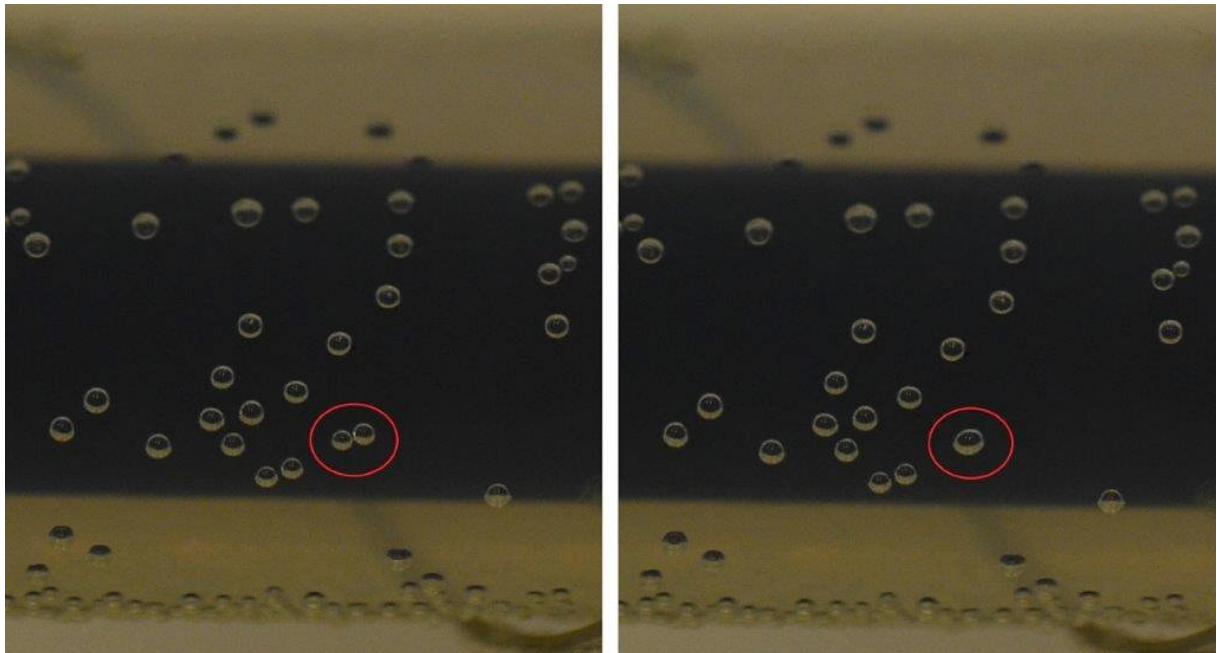


Figur 4.8: Antall partielle utladninger per ladningsnivå. Grafen er laget i Excel der ladningsverdiene er hentet fra stream-funksjonen brukt i OMICRON



Figur 4.9: Antall partielle utladninger på over 10 pC. Grafen er laget i Excel der ladningsverdiene er hentet fra stream-funksjonen brukt i OMICRON

I Figur 4.10 kan en se at to luftbobler går sammen til en. Dette skjedde ved spenningsoppkjøring før det oppsto partielle utladninger. Det er observert at luftbobler går sammen og sprekker opp uten at det vises i PD-plottet at det har oppstått partielle utladninger. Først når mange nok luftbobler begynner å bevege seg og sprekke opp vil det vises i PD-plottet at det oppstår partielle utladninger.



Figur 4.10: To bobler går sammen til én ved spenningsoppkjøring til 30 kV. Bildet til venstre er ved 11 kV og bildet til høyre er ved 11.25 kV. Bildene er tatt med 1.5 minutters mellomrom

4.2.3.2 24-timers målinger

Spenningen ble kjørt rett opp til 20 kV. Målinger på 1 time ble tatt i 24 timer, med 5 sekunder pause mellom målingene. Stream-funksjonen ble brukt ved første og siste måling.

Formålet med dette forsøket var å se om antallet partielle utladninger ville reduseres over tid ved en konstant spenning på 20 kV. Forsøket ble kjørt to ganger for å sjekke reproduserbarhet.

Resultatene fra første forsøk var ikke som forventet. Det oppsto ikke partielle utladninger de første 6 timene, men fra den 7. til den 24. timen oppsto det en del utladninger. Grunnen til dette kan være at vannet ikke var varmet opp til romtemperatur før forsøket ble startet. Varmt vann kan ikke holde like mye gass som kaldt vann. Dersom vannet ikke var varmet opp til romtemperatur, kan det hende at det ble dannet flere luftbobler og dermed oppsto partielle utladninger etter hvert som vannet ble varmet opp. I Vedlegg D, Figur D.1, vises PD-plottet fra den første timen. I Figur D.2 vises PD-plottet fra den siste timen.

I andre forsøk oppsto det partielle utladninger de første 16 timene. Fra den 17. til den 24. timen oppsto det ikke utladninger. Her er det notert at vannet sto til oppvarming i 1.5 timer før forsøket ble påbegynt. Dette kan være grunnen til at det oppsto partielle utladninger i starten av forsøket. Grunnen til at det sluttet å oppstå partielle utladninger etter 16 timer kan være at luftbobler sprekker opp eller beveger seg slik at det ikke lenger oppstår partielle utladninger i dem. I Vedlegg D, Figur D.3, vises PD-plottet fra den første timen. I Figur D.4 vises PD-plottet fra den siste timen.

4.2.3.3 Initiering av én luftboble

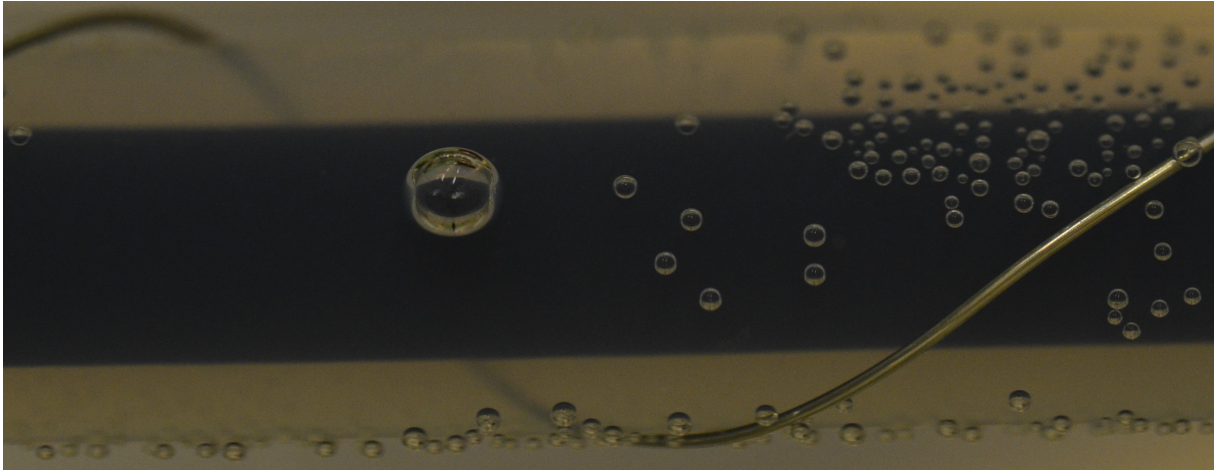
En luftboble ble lagt på kabelens overflate, først mellom metalltrådene, og deretter under en metalltråd. Forsøket ble gjennomført 3 ganger per posisjon, til sammen 6 forsøk.

I forsøkene utført uten metalltråd ble det ikke registrert PD da kun én boble ble lagt på kabelens overflate. Formålet med dette forsøket var å se om det ville oppstå PD med én luftboble på kabelens overflate med metalltråd surret rundt. Det skulle også undersøkes om det hadde betydning om luftboblen lå mellom metalltrådene eller under en metalltråd.

Før forsøkene ble påbegynt ble kabelen kondisjonert opp til 20 kV (ved 24-timers forsøk). I tilfellene hvor de partielle utladningene oppsto ved en høyere spenning enn 20 kV er det mulig at utladningene oppsto i de små luftboblene, og ikke i luftboblen som ble lagt på.

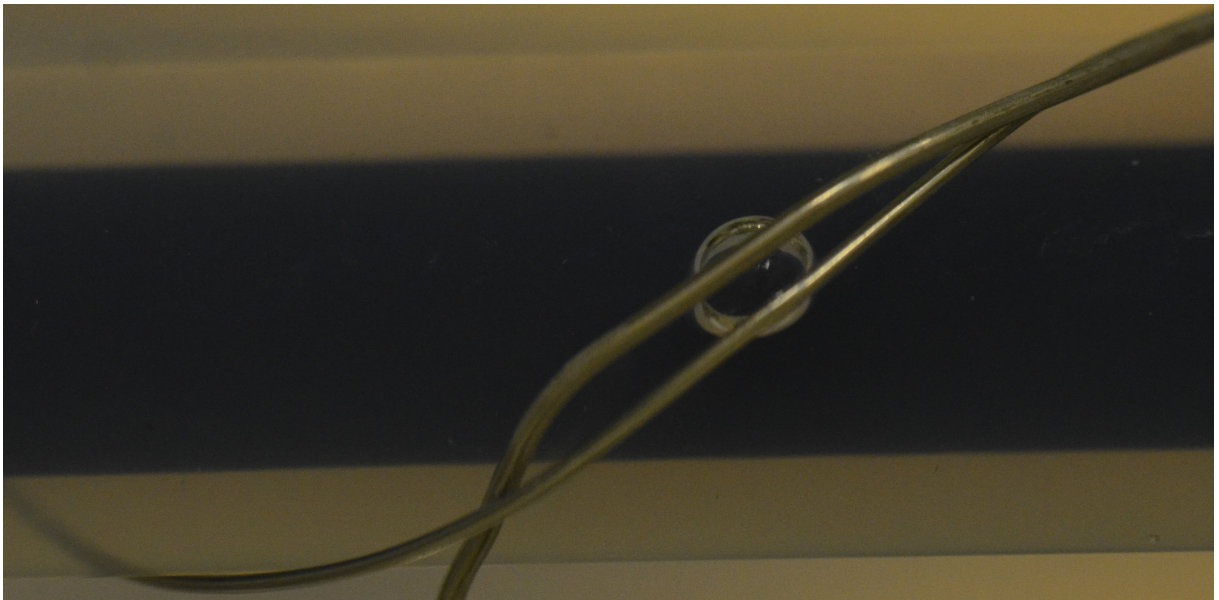
4.2.3.3.1 Mellom metalltrådene I de tre forsøkene oppsto det PD ved henholdsvis 26.5 kV, 24 kV og 17.5 kV, men luftboblen sprakk ikke opp i noen av forsøkene. Spenningen ble kjørt opp til 30 kV, og det var derfor overraskende at luftboblene ikke sprakk opp, da luftboblene som ble lagt på kabelen var ganske store.

I Figur 4.11 vises en luftboble som er lagt mellom metalltrådene.



Figur 4.11: Luftboble lagt på kabelens overflate mellom to metalltråder. Luftboblen sprakk ikke opp ved spenningoppkjøring til 30 kV

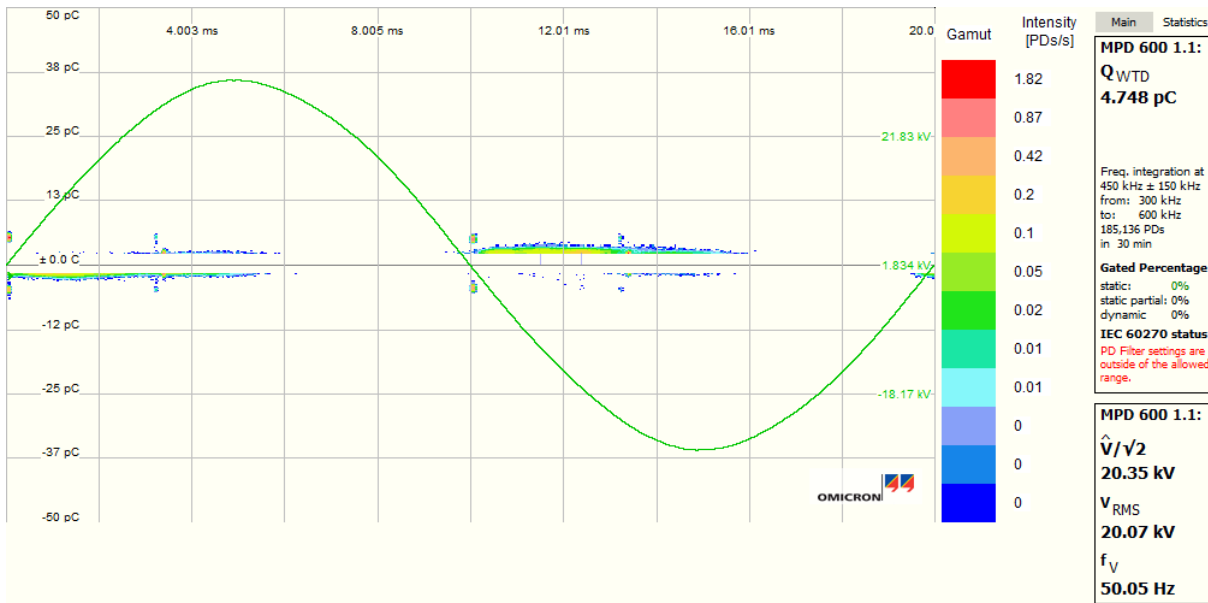
4.2.3.3.2 Under metalltråder Før luftboblen ble lagt på kabelen, ble det lagt på en ekstra metalltråd slik at luftboblen lettere skulle holde seg under tråden, se Figur 4.12. I de tre forsøkene oppsto det PD ved henholdsvis 24.5 kV, 27 kV og 13 kV, men luftboblen sprakk ikke opp ved noen av forsøkene. Spenningen ble kjørt opp til 30 kV, og luftboblene sprakk ikke opp. Etttersom luftboblene lå under to metalltråder var det ikke så overraskende at luftboblene ikke sprakk opp.



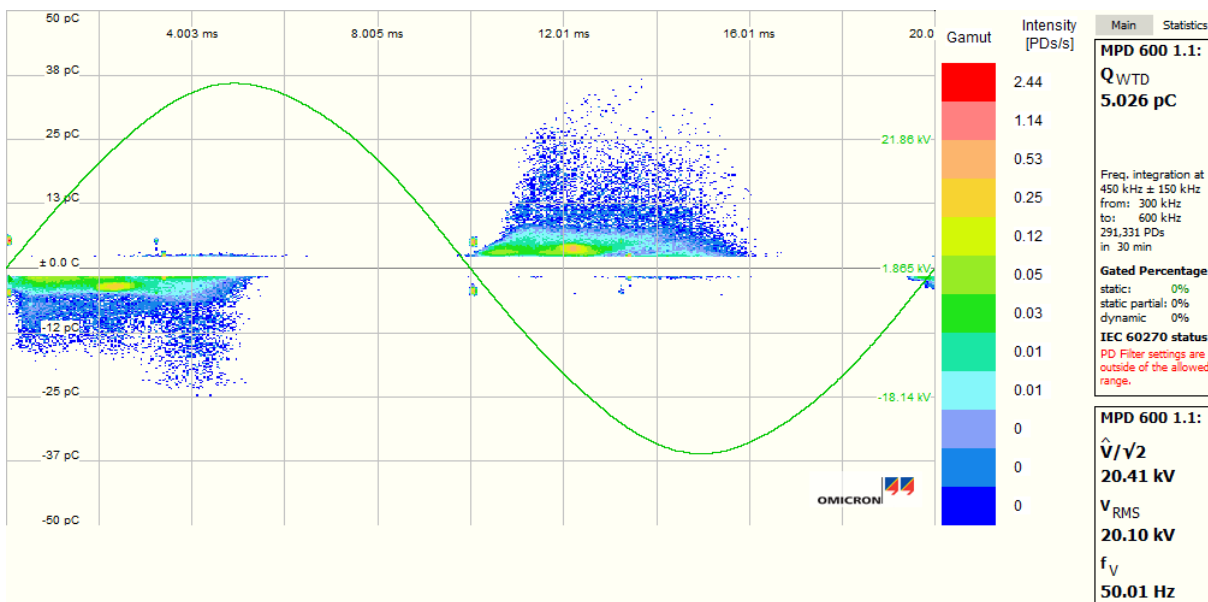
Figur 4.12: Luftboble lagt på kabelens overflate under to metalltråder. En ekstra bit metalltråd ble lagt på for at luftboblen lettere skulle holde seg under tråden

4.2.3.4 Varighetstest med luftbobler under tråd

Spenningen ble kjørt opp til 20 kV. 3 bobler ble lagt under hver av trådene, 6 bobler til sammen. PD-målinger på 30 min ble utført, med 30 min pause mellom målingene. Stream-funksjonen ble brukt ved første og siste måling.



Figur 4.13: Utladningsmønsteret ved siste måling før kableen stakk opp over vannet



Figur 4.14: PD da kableen stakk over vannet, og en del av kableen ikke lenger var isolert

Varighetstesten skulle stå i 6 dager, men ble automatisk skrudd av da noe av vannet kabelen lå i fordampet, slik at litt av kabelen kom over vannet. Når litt av vannet fordampet var ikke lenger hele kabelen isolert, og det ble derfor gjennomslag i kabelen. Figur 4.13 viser utladningsmønsteret ved siste måling før kabelen stakk opp over vannet. Figur 4.14 viser utladningsmønsteret da kabelen stakk opp over vannet. I neste PD-plott var spenningen automatisk skrudd av.

Det var ikke synlig på kabelen at den var ødelagt, men ved spenningsoppkjøring oppsto det PD allerede ved 2.5 kV, og det gikk en veldig høy strøm gjennom testobjektet. Gjennomslaget skjedde mest sannsynlig i enden av sølvepoxymalingen der sølvepoxymalingen ser ut til å ha forandret seg noe. Det er ikke undersøkt videre hvor gjennomslaget fant sted.

Et nytt testobjekt ble laget, slik at ytterligere forsøk kunne gjennomføres.

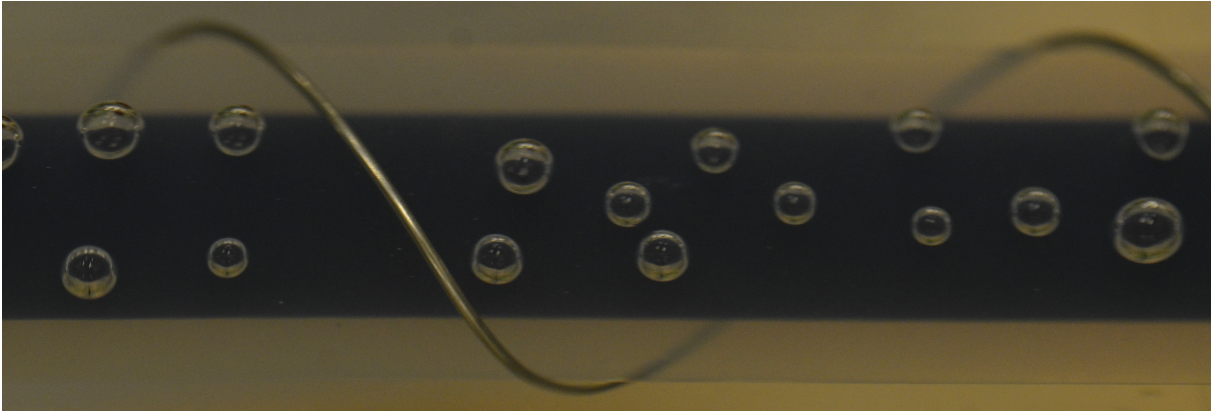
4.2.3.5 Initiering av 300 bobler

Før dette forsøket ble utført ble det helt oppi nytt vann. Luftboblene ble forsøkt fjernet ved å kjøre spenningen opp til 30 kV. Da de partielle utladningene ikke sluttet å oppstå, ble luftboblene fjernet manuelt med en pensel.

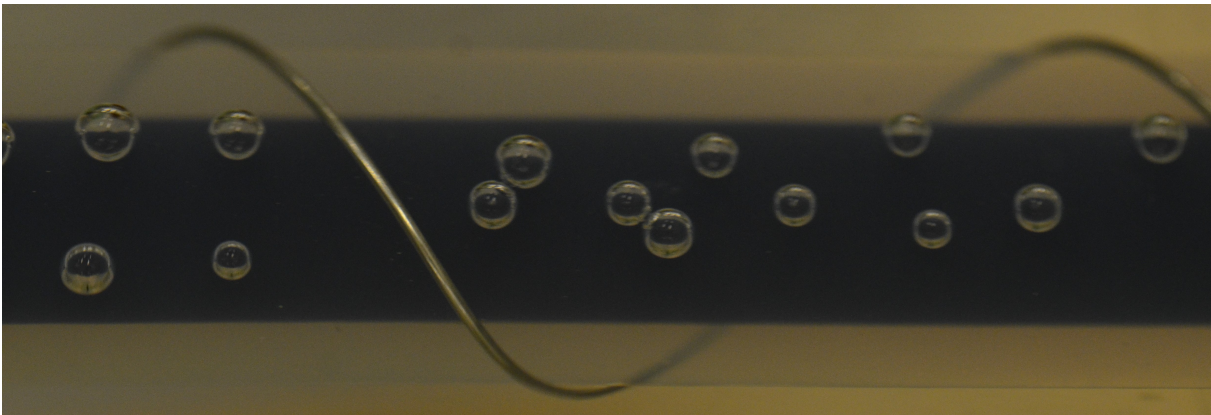
Deretter ble 300 luftbobler lagt på kabelens overflate ved hjelp av en liten sprøyte. Luftboblene ble lagt mellom metalltrådene. Spenningen ble trinnvis kjørt opp til 20 kV med en endring på 2.5 kV. Spenningen på 20 kV sto på i 2 timer for å se om PD-aktiviteten endret seg over tid.

Figur 4.15 viser hvordan noen av luftboblene lå på kabelen ved 2.5 kV. Luftboblene hadde her ikke begynt å bevege seg. Figur 4.16 viser luftboblene 1 minutt etter at spenningen ble kjørt opp til 20 kV. En kan se at den største luftboblen har sprukket opp og at flere av luftboblene har beveget seg. I Figur 4.17 ser man at 4 luftbobler har sprukket opp. To og to luftbobler har her beveget seg mot hverandre og til slutt gått sammen. I det luftboblene har gått sammen har de også sprukket opp.

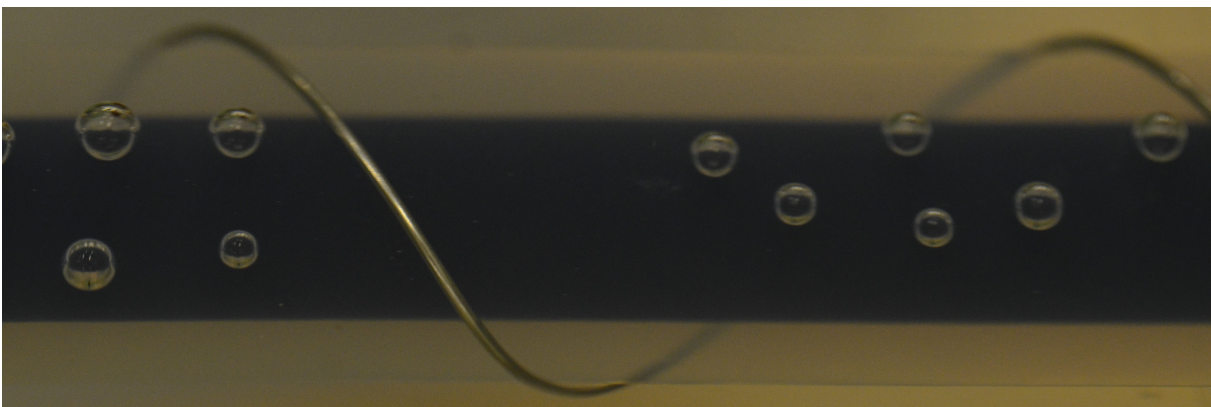
Dette forsøket ble utført 5 ganger. Det ble etter hvert vanskeligere å legge på bobler, og dette er nok på grunn av at vannet ble varmet opp til romtemperatur.



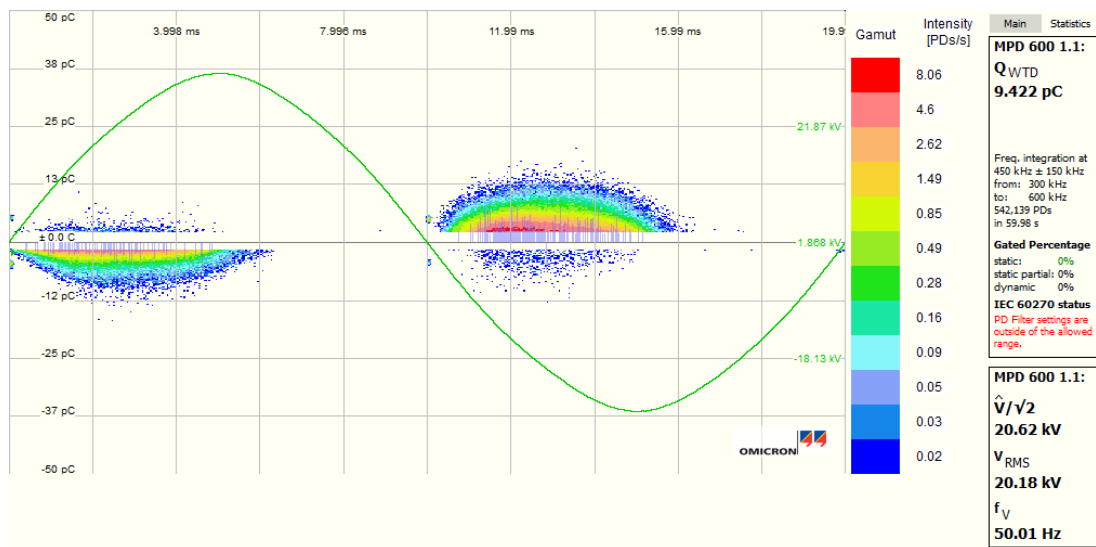
Figur 4.15: Luftbobler på overflaten av kabelen ved starten av forsøket (2.5 kV)



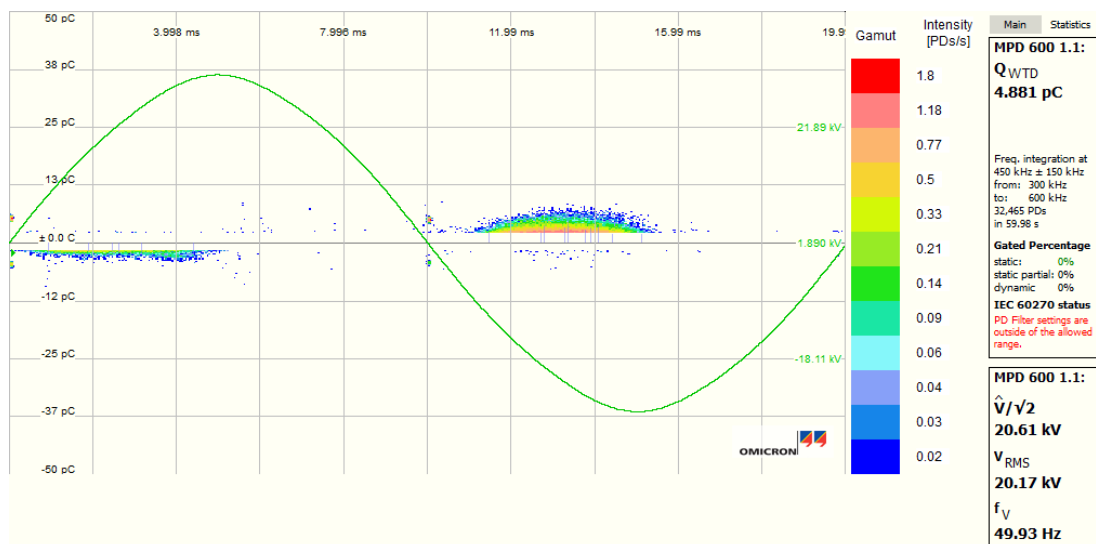
Figur 4.16: Luftbobler på overflaten av kabelen etter spenningsoppkjøring til 20 kV. En kan se at noen av luftboblene har beveget seg nærmere hverandre, og at en stor luftboble nede til høyre har sprukket opp



Figur 4.17: Luftbobler på overflaten av kabelen etter at 4 bobler har sprukket opp. To og to luftbobler gikk sammen og sprakk deretter opp ved konstant spenning på 20 kV



Figur 4.18: Utladningsmønsteret ved første måling ved 20 kV. Over 542 000 utladninger i løpet av 1 minutt

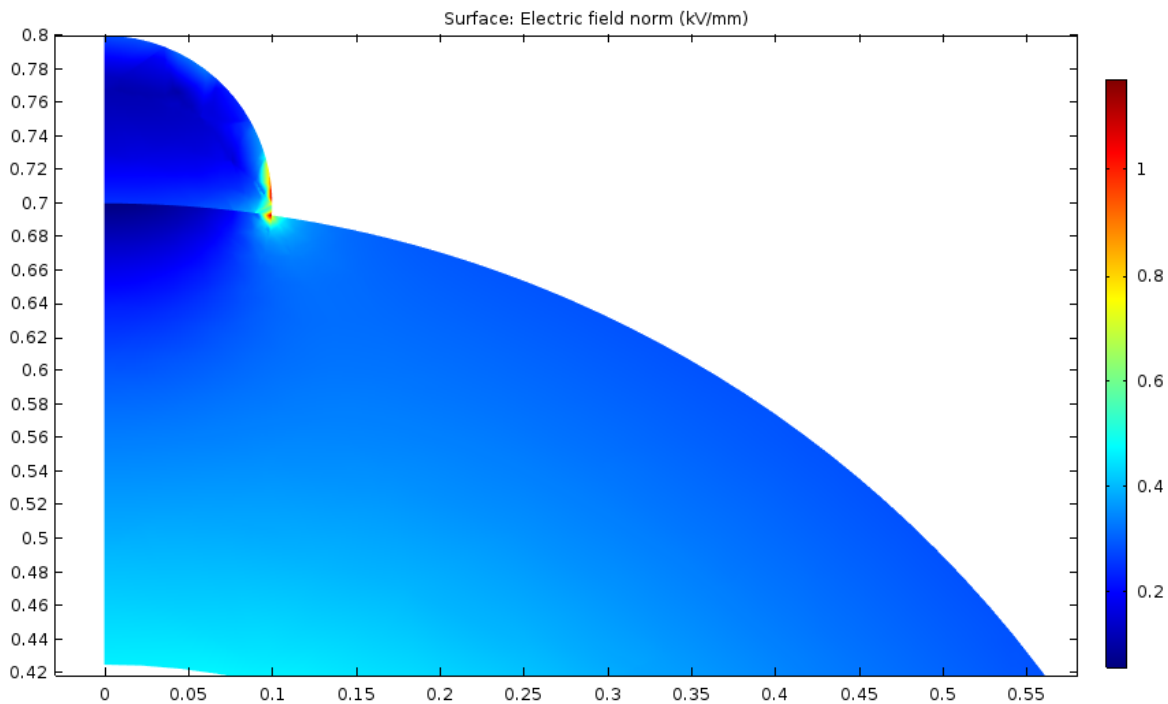


Figur 4.19: Utladningsmønsteret etter 2 timer ved 20 kV. Over 32 000 utladninger i løpet av 1 minutt

I PD-plottene i Figur 4.18 og 4.19 kan en se at både antallet partielle utladninger og utladningenes størrelse er kraftig redusert etter at forsøket har stått på i 2 timer. Grunnen til dette er at mange av luftboblene det oppstår partielle utladninger i sprekker opp eller beveger seg slik at de ikke lenger blir påvirket. Det vil lettere oppstå partielle utladninger i en luftboble som ligger godt festet til kabelen, og dermed har et stort areal i kontakt med kabelens overflate. Dersom luftboblen får dårligere feste til kabelen vil det være mindre sannsynlig at det oppstår partielle utladninger i den.

4.3 Elektrisk felt - COMSOL Multiphysics

Det elektriske feltet som oppstår i isolasjonsmaterialet og i en luftboble er modellert i COMSOL Multiphysics 5.2, og resultatet kan ses i Figur 4.20. Den påtrykte spenningen er satt til 1 kV. Det elektriske feltet er størst i kanten av luftboblen. I Figur 4.21 er området med det største elektriske feltet forstørret.



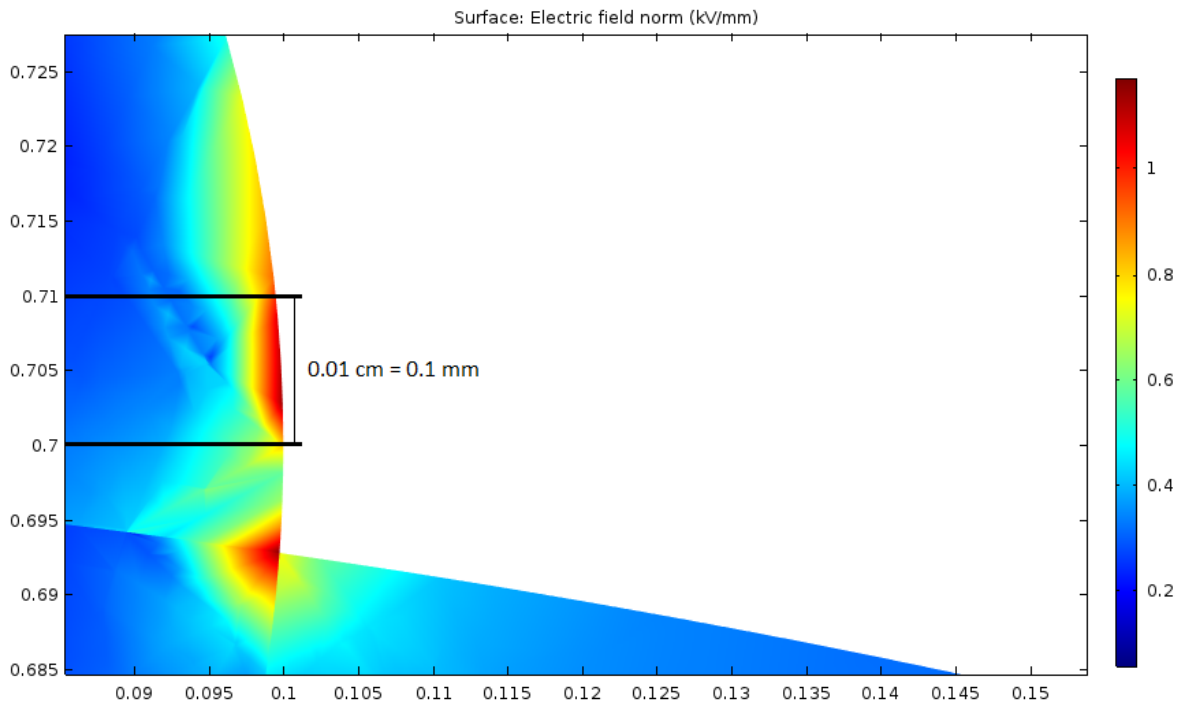
Figur 4.20: Elektrisk felt i isolasjonsmaterialet og i en luftboble modellert i COMSOL. Luftboblen er her plassert slik at den er en halvkule

I figurer 4.20 til 4.23 viser x- og y-aksen posisjon i cm. Ved å se på Figur 4.21 kan en regne ut spenningen i en gitt posisjon i luftboblen.

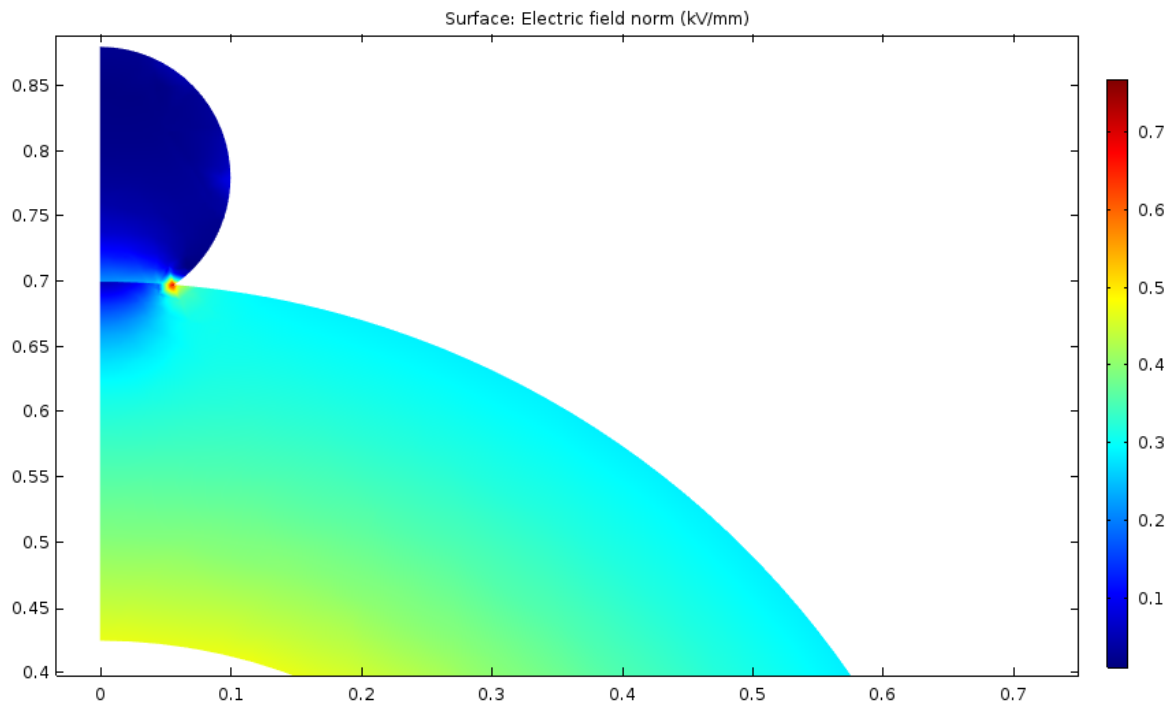
Figur 4.21 viser området med det høyeste elektriske feltet forstørret. Det er i dette området antatt at det gjennomsnittlige elektriske feltet er på $1 \frac{kV}{mm}$. Området er 0.1 mm, og dette gir en spenning på:

$$0.1 \text{ mm} \cdot 1 \frac{kV}{mm} = 100 \text{ V}$$

Dette er ved en påtrykt spenning på 1 kV. Det kan antas at forholdet er lineært.



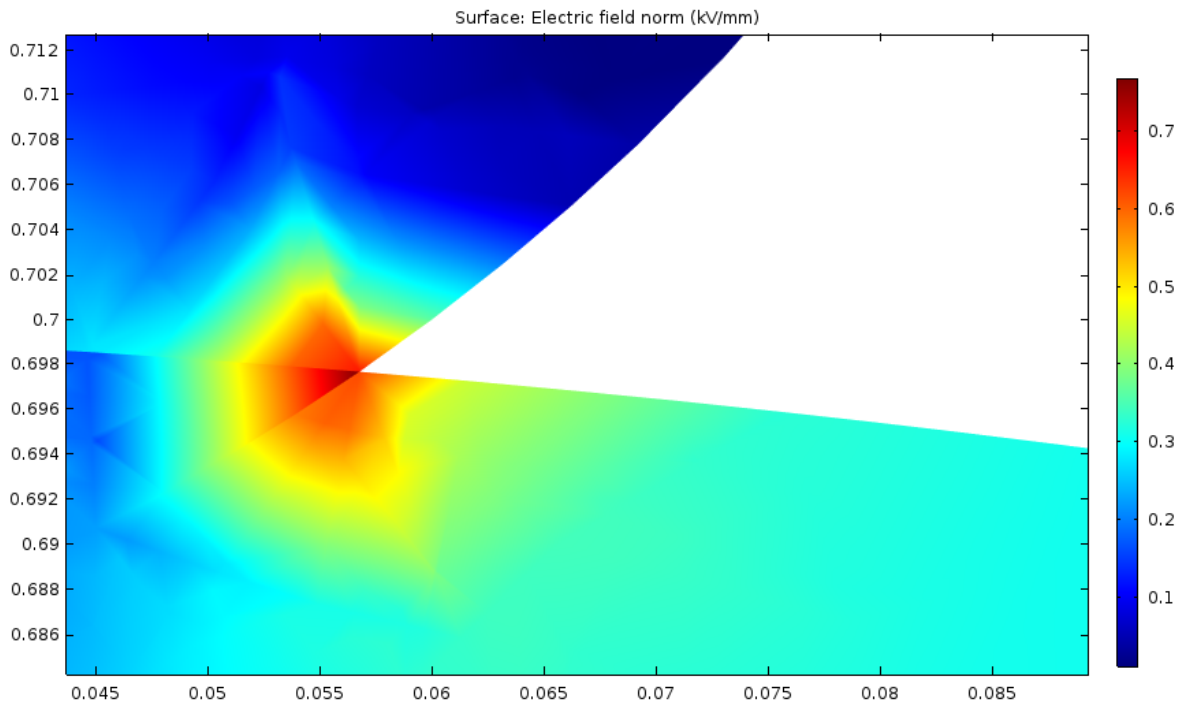
Figur 4.21: Elektrisk felt i isolasjonsmaterialet og i en luftboble modellert i COMSOL. Luftboblen er her plassert slik at den er en halvkule. Området med det høyeste elektriske feltet er forstørret. Gj.snittlig elektrisk felt i det markerte området er antatt å være 1 kV



Figur 4.22: Elektrisk felt i isolasjonsmaterialet og i en luftboble modellert i COMSOL. Luftboblen er her plassert slik at den er dårligere festet til kabelen enn i Figur 4.20. Luftboblen er 90 % av en kule (prosent ift. diameter)

Luftboblen ble deretter flyttet lenger opp, slik at den hadde et mindre areal i kontakt med kabelens overflate. I Figur 4.22 kan en se hvordan det elektriske feltet fordeler seg i isolasjonsmaterialet og i luftboblen, når luftboblen er 90 % av en kule (prosent ift. diameter). Figur 4.23 viser området med det største elektriske feltet forstørret.

I Figur 4.20 går skalaen fra $0.2 - 1 \frac{kV}{mm}$, mens i Figur 4.22 går skalaen fra $0.1 - 0.7 \frac{kV}{mm}$. Dette viser at det elektriske feltet er høyere dersom luftboblen har større kontaktoverflate mot kabelen.



Figur 4.23: Elektrisk felt i isolasjonsmaterialet og i en luftboble modellert i COMSOL. Luftboblen er 90 % av en kule. Området med det høyeste elektriske feltet er forstørret

Det ble også modellert en luftboble som er 75 % av en kule (prosent ift. diameter). Resultatene kan ses i Vedlegg B, Figur B.1 og B.2.

I tillegg ble det modellert tre forsøk med henholdsvis én luftboble 0.5 mm fra en metalltråd, én luftboble under en metalltråd og uten metalltråd. Disse forsøkene ble gjort med en luftboble med diameter på 2 mm som ligger på kabelen som en halvkule. I Vedlegg B, Figur B.3, vises modellen der luftboblen ligger 0.5 mm fra en metalltråd, og i Figur B.4 vises modellen der luftboblen ligger under en metalltråd. Det elektriske feltet som oppsto ved disse modelleringene var helt likt det som oppsto med én luftboble mellom to metalltråder, som vist i Figur 4.20 og 4.21.

5 Konklusjon

Det har blitt utført PD-målinger på en motorkabel uten ytre halvleder. Det er utført forsøk der kabelen har ligget i vann tilsatt 10 % Tween 80, men hovedfokuset har vært på kabel som har ligget i rent vann.

Følgende konklusjoner kan trekkes:

- Det oppstår ikke partielle utladninger dersom det ikke er surret en metalltråd rundt kabelen.
- Det oppstår partielle utladninger i luftbobler som ligger på kabelens overflate når kabelen ligger i vann (med metalltråd). Det må mange luftbobler til for at det skal gi utslag i PD-plottene. 11 luftbobler gir ikke utslag, mens 300 luftbobler gir utslag.
- Tennspenningen varierer fordi systemet er dynamisk, men i 4 av 5 forsøk der det ble lagt på 300 luftbobler var tennspenningen 12.5 kV.
- Antallet partielle utladninger og utladningenes størrelse reduseres ved en konstant spenning på 20 kV i 2 timer. Dette er fordi mange luftbobler sprekker opp eller beveger seg slik at de ikke lenger blir påvirket av den påtrykte spenningen (påvirket i den grad at det oppstår partielle utladninger i dem).
- Luftbobler sprekker ofte opp ved at to nærliggende bobler går sammen og deretter sprekker opp. Større luftbobler sprekker ofte opp uten å gå sammen med en nærliggende luftboble. At luftbobler beveger seg, går sammen og sprekker opp er observert også før det oppstår partielle utladninger. Når mange nok luftbobler påvirkes av den påtrykte spenningen, vil det oppstå partielle utladninger.
- Det elektriske feltet vil være høyere i en luftboble med større kontaktareal mot kabelen enn en luftboble med et lite kontaktareal mot kabelen. Dette har vist seg i modelleringer utført i COMSOL.
- Modellering i COMSOL viser at en påtrykt spenning på 1 kV fører til at spenningen i et område av luftboblen på 0.1 mm blir 100 V. Forholdet kan antas å være lineært.

6 Videre arbeid

Nedenfor er det listet opp forslag til hva som kan gjøres i videre arbeid:

- Det kan gjøres forsøk der en legger på så mange luftbobler som mulig under metalltråden, og deretter kjører spenningen opp til 20 kV og lar det stå i 2 timer. (Samme forsøk som ble utført i denne oppgaven, bortsett fra at luftboblene plasseres under metalltråden).
- Det kan være interessant å se på lysutslipp ved partielle utladninger i luftbobler, samt luftboblenes levetid ved partielle utladninger.
- Det kan være interessant å se på andre metoder for å redusere overflatespenningen til en væske (for eksempel koking av vann).
- Det kan undersøkes om temperatur spiller en viktig rolle.
- Det kan produseres egne prøveobjekter av isolasjonsmaterialet FEP med organiske og uorganiske forurensninger, og referanseobjekter (uten forurensninger). Disse kan testes for gjennomslag i laboratoriet. Ved å lage egne prøveobjekter kan man være helt sikker på at det er forurensninger i prøveobjektene. Man kan da finne ut hvilket utladningsmønster som dannes ved forurensninger i isolasjonsmaterialet.
- Det kan lages flere modeller i COMSOL hvor luftboblens størrelse eller plassering endres.

Bibliografi

- [1] Petrowiki. http://petrowiki.org/Electrical_submersible_pumps, 11/12/16.
- [2] FEP Handbook. http://www.rjchase.com/fep_handbook.pdf, 12/12/16.
- [3] A. Hammond, M. Stavnes, J. Suthar og J. Laghari. *Effects of Thermal and Electrical Stressing on the Breakdown Behavior of Space Wiring*. NYMA, Inc. NASA Lewis Research Center Cleveland, Ohio 44135 og SUNY at Buffalo ECE Department Buffalo, New York 14250.
- [4] Leader - XLPE insulated power cable. <http://www.leadcable.com.my/dl/leader-xlpe.pdf>, 19/12/16.
- [5] Dupont FEP Fluorocarbon film. http://www.midwestpcb.com/data_sheets/DuPontFEPBondingFilm.pdf, 17/12/16.
- [6] Royal Society of Chemistry. <http://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2014/ra/c4ra04635h>, 17/12/16.
- [7] The Partial Discharge Academy. <http://www.partial-discharge-academy.com/what-is-partial-discharge>, 1/12/16.
- [8] Lars Lundgaard. *Partielle utladninger Begreper, måleteknikk og mulige anvendelser for tilstandskontroll*. SINTEF Energi AS, Mars 1996.
- [9] Erling Ildstad. "Electric breakdown of solid insulation materials" in *TET4160 Insulating Materials for High Voltage Applications*, Trondheim: NTNU, 2015. Kap. 9, side 212-215.
- [10] Dictionary. <http://www.dictionary.com/browse/corona-discharge>, 6/12/16.
- [11] C.G. Malmberg og A.A. Maryott. Dielectric constant of water from 0 ° to 100 °C. *Research of the National Bureau of Standards*, 56(1), 1956.
- [12] Physics Resources Database. http://www.physics.usyd.edu.au/teach_res/db/d0006c.htm, 16/06/17.
- [13] Allkunne - levande leksikon. <http://www.allkunne.no/framside/naturvitskap/fysikk/mekanikk/overflatespenning/120/1835/>, 2/12/16.
- [14] Krüss - Advancing your Surface Science. <https://www.kruss.de/services/>

[education-theory/glossary/surfactant/](#), 6/12/16.

- [15] Agata Bąk and Wioletta Podgórska. Interfacial and surface tensions of toluene/water and air/water systems with nonionic surfactants Tween 20 and Tween 80. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 504:414 – 425, 2016.
- [16] Yuehua Yuan og T. Randall Lee. "Contact Angle and Wetting Properties" in *Surface Science Techniques*, 2013. Kap. 1, side 3-5.
- [17] Abhinandan Agrawal. *Surface Tension of Polymers*. Hatsopoulos Microfluids Laboratory, Department of Mechanical Engineering, Massachusetts Institute of Technology, 2005, <http://web.mit.edu/nmf/education/wettability/summerreading-2005short.pdf>.
- [18] S. Ghosh and N. K. Kishore. Modelling partial discharge inception and extinction voltages of sheet samples of solid insulating materials using an artificial neural network. *IEE Proceedings - Science, Measurement and Technology*, 149(2):73–78, 2002.
- [19] Hans Lavoll Halvorson. Condition Assessment of Wind Farm Medium Voltage Cable Joints, 2012. Masteroppgave.
- [20] Datablad - EPO-TEK E4110. http://www.epotek.com/site/administrator/components/com_products/assets/files/Style_Uploads/E4110.pdf, 17/06/17.

A Vedlegg A - Utstyrsliste

Tabell A.1: Liste over komponenter brukt på laboratoriet

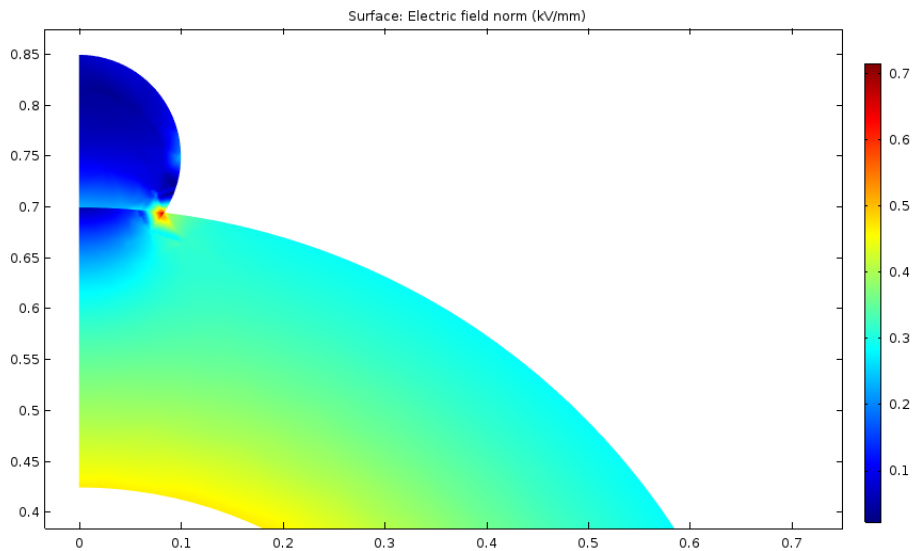
Komponent	Registreringsnummer
Styrepult	B01-0144
Transformator	B01-0424
Koblingskondensator	SEfAS K03-0145
OMICRON måleimpedans CPL 542A	H02-0133-13
OMICRON signalmåler MPD 600	H02-0132-03
OMICRON batteri MPP 600	H02-0132-04
	H02-0133-07
	H02-0131-11
OMICRON fiberoptikk MCU 502	H02-0132

Tabell A.2: Andre komponenter som er brukt i løpet av masteroppgaven

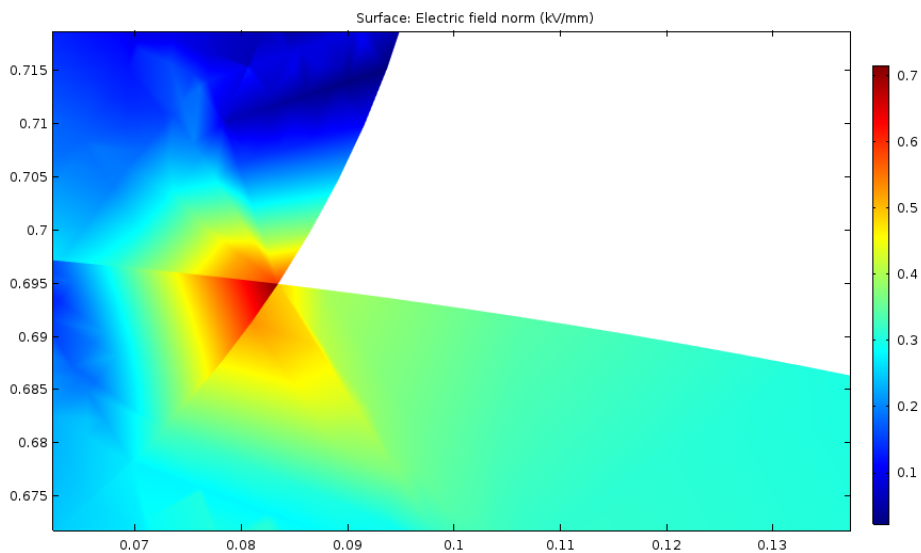
Komponent
Hamilton MICROLITER Syringe
Digitalt mikroskop, Keyence VHX-500K

B Vedlegg B - COMSOL

B.1 Elektrisk felt

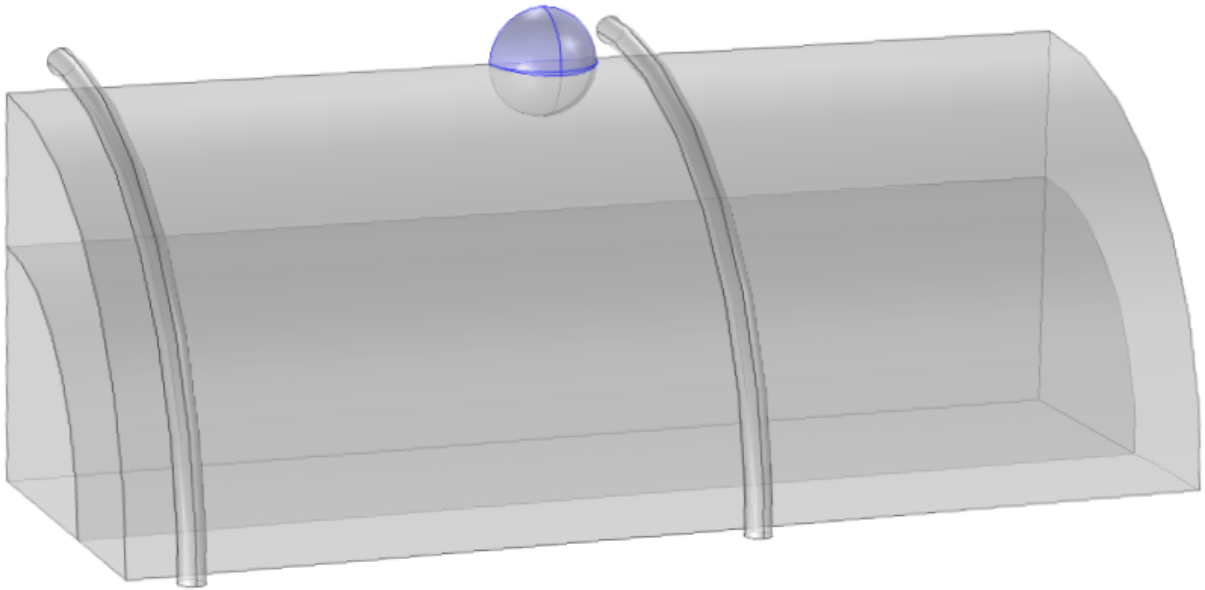


Figur B.1: Elektrisk felt i isolasjonsmaterialet og i en luftboble modellert i COMSOL. Luftboblen er 75 % av en kule (prosent ift. diameter)

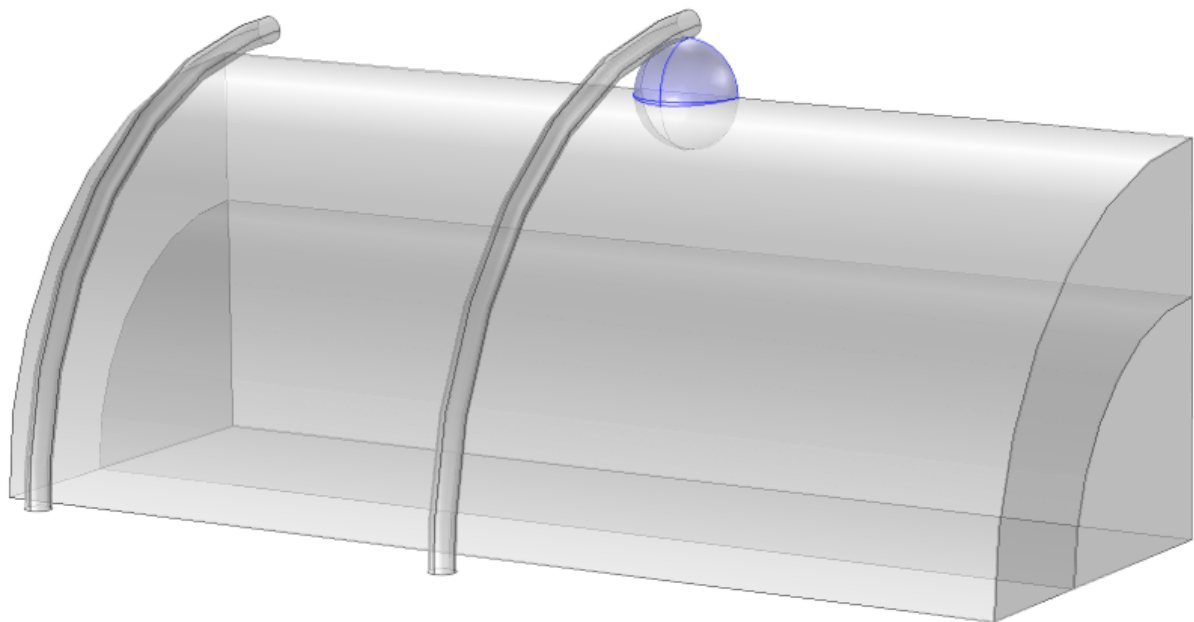


Figur B.2: Elektrisk felt i isolasjonsmaterialet og i en luftboble modellert i COMSOL. Samme modell som i Figur B.1, men området med høyest elektrisk felt er forstørret

B.2 Luftboble ved og under metalltråd



Figur B.3: Luftboble med diameter 2 mm ligger 0.5 mm fra en metalltråd. Luftboblen er en halvkule



Figur B.4: Luftboble med diameter 2 mm ligger under en metalltråd. Luftboblen er en halvkule

C Vedlegg C - Datablad EPO-TEK E4110



EPO-TEK[®] E4110

Technical Data Sheet
For Reference Only
Electrically Conductive, Silver Epoxy (formerly EP110)

Date: Oct 2015 **Rev:** VIII
No. of Components: Two
Mix Ratio by Weight: 10 : 1
Specific Gravity: Part A: 3.10 Part B: 0.95
Pot Life: 4 Hours
Shelf Life- Bulk: One year at room temperature

Recommended Cure: 150°C / 1 Hour

Minimum Alternative Cure(s): <i>may not achieve performance properties below</i>
150°C / 15 Minutes
100°C / 1 Hour
80°C / 3 Hours
60°C / 6 Hours
23°C / 3 Days

NOTES:

- Container(s) should be kept closed when not in use.
- Filled systems should be stirred thoroughly before mixing and prior to use.
- Performance properties (rheology, conductivity & others) may vary from those stated below when syringe packaging and/or post-processing is required.
- Syringe packaging will impact initial viscosity and effective pot life, potentially beyond stated parameters.

Product Description: EPO-TEK[®] E4110 is an electrically conductive, silver-filled epoxy paste. This two component system is designed for low temperature curing from ambient to 80°C, although other heat cures can be used.

Typical Properties: *Cure condition: 150°C/1 Hour *denotes test on lot acceptance basis Data below is not guaranteed. To be used as a guide only, not as a specification. Different batches, conditions & applications yield differing results.*

PHYSICAL PROPERTIES:			
* Color (before cure):	Part A: Silver	Part B: Clear	
* Consistency:	Smooth flowing paste		
* Viscosity (23°C) @ 100 rpm:	800 - 1,600 cPs		
Thixotropic Index:	2.1		
* Glass Transition Temp:	≥ 40 °C (Dynamic Cure:20-200°C/ISO 25 Min; Ramp -10-200°C @ 20°C/Min)		
Coefficient of Thermal Expansion (CTE):			
	Below Tg:	48 x 10 ⁻⁶ in/in°C	
	Above Tg:	150 x 10 ⁻⁶ in/in°C	
Shore D Hardness:	60		
Lap Shear @ 23°C:	1,266 psi		
Die Shear @ 23°C:	≥ 5 Kg	1,700 psi	
Degradation Temp:	380 °C		
Weight Loss:	@ 200°C	0.70 %	
Suggested Operating Temperature:	< 250 °C (Intermittent)		
Storage Modulus:	518,756 psi		
Ion Content:	Cl:	151 ppm	NA ⁺ : 23 ppm
	NH ₄ ⁺ :	23 ppm	K ⁺ : 31 ppm
* Particle Size:	≤ 45 microns		
ELECTRICAL AND THERMAL PROPERTIES:			
Thermal Conductivity:	1.4 W/mK		
* Volume Resistivity @ 23°C (25°C/40-60%RH/3 Day cure):	≤ 0.009 Ohm-cm		
* Volume Resistivity @ 23°C (150°C/ 1 Hour):	≤ 0.0005 Ohm-cm		

Epoxyes and Adhesives for Demanding Applications™

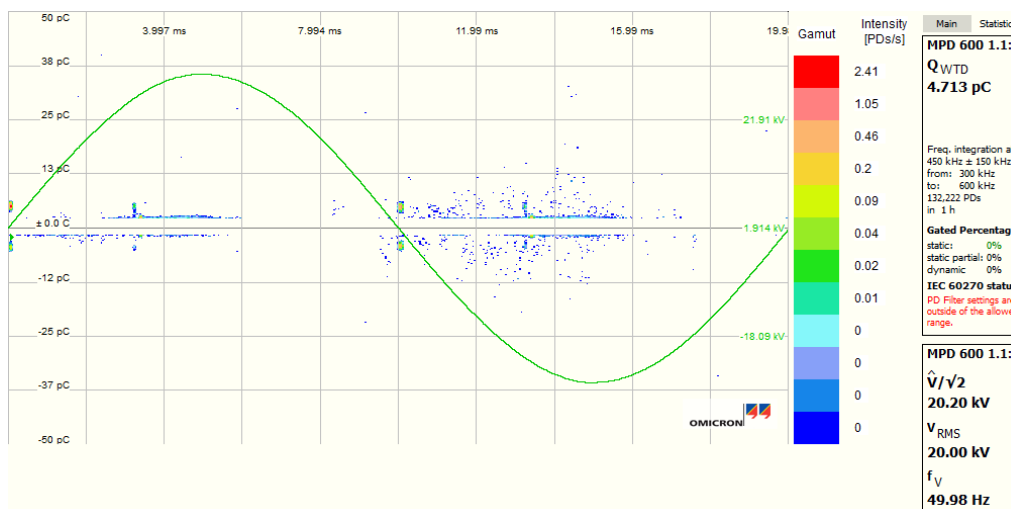
This information is based on data and tests believed to be accurate. Epoxy Technology, Inc. makes no warranties (expressed or implied) as to its accuracy and assumes no liability in connection with any use of this product.

EPOXY TECHNOLOGY, INC.
 14 FORTUNE DRIVE, BILLERICA, MA 01821 (978) 667-3805, FAX (978) 663-9782
www.epotek.com

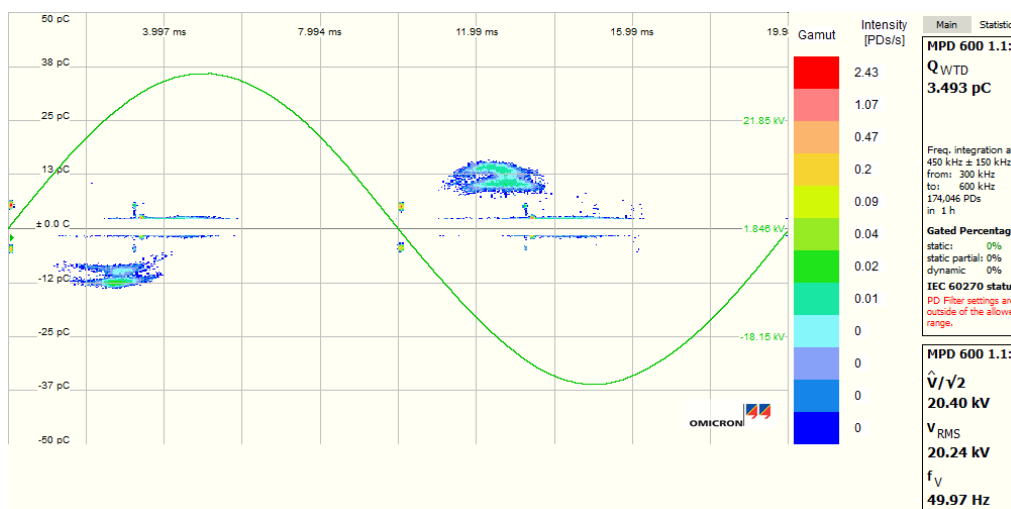
Figur C.1: Datablad EPO-TEK E4110 [20]

D Vedlegg D - PD-plott fra 24-timers forsøk

D.1 Forsøk 1

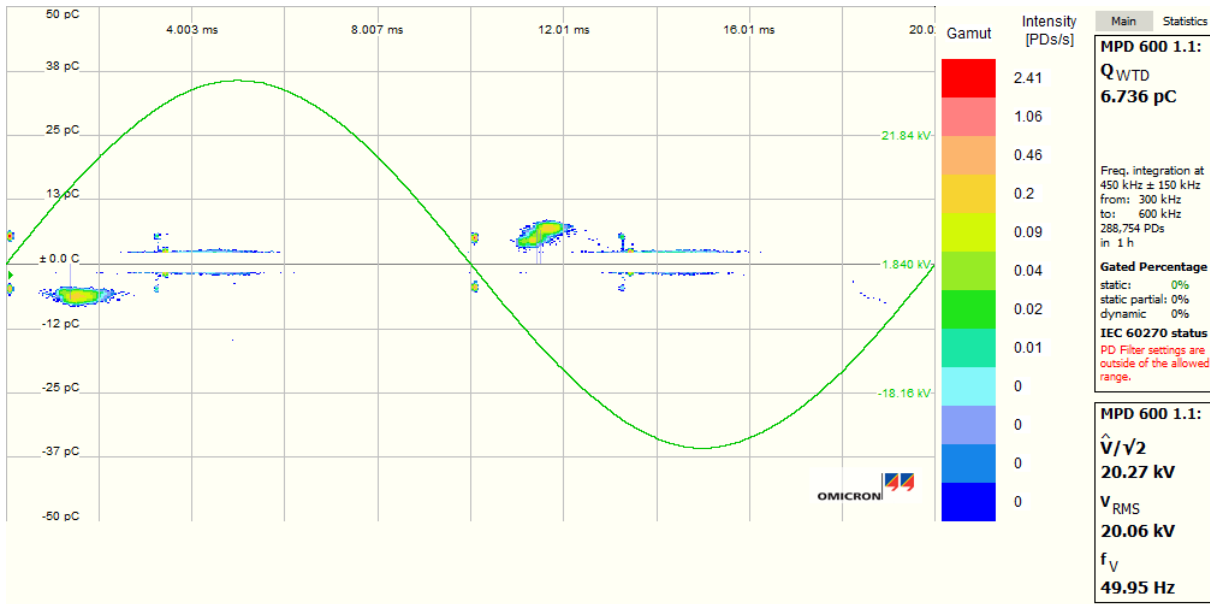


Figur D.1: PD-plott etter 1 time. Utladningene som vises her er støy

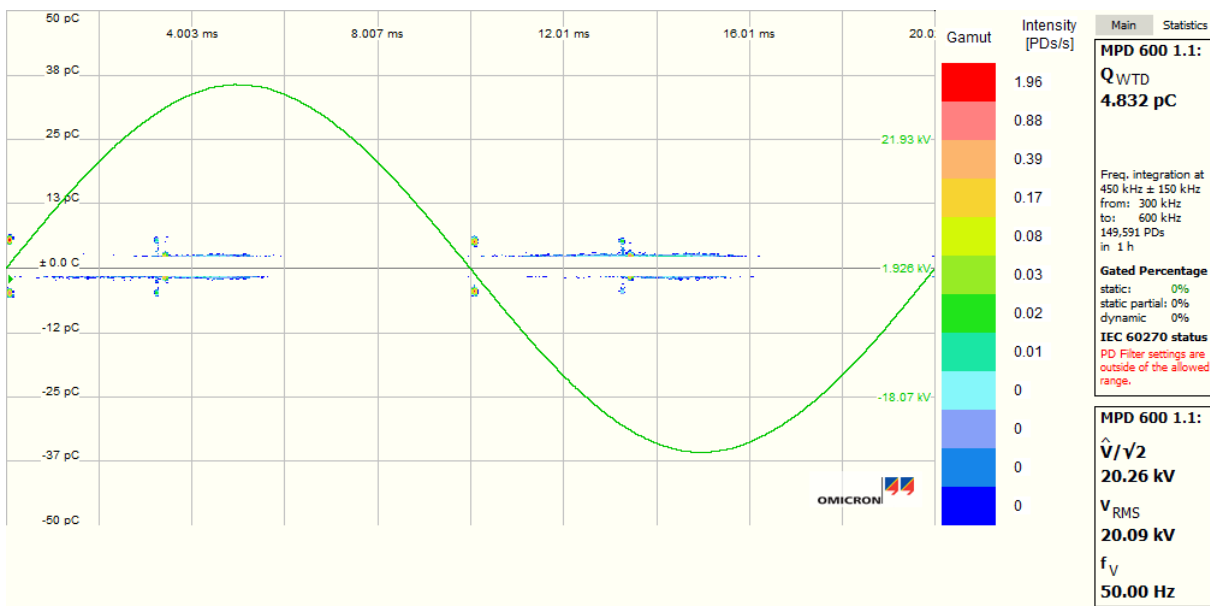


Figur D.2: PD-plott etter 24 timer med 20 kV. Det begynte å oppstå partielle utladninger etter 6 timer

D.2 Forsøk 2



Figur D.3: Partielle utladninger i luftbobler etter 1 time



Figur D.4: PD-plott etter 24 timer. Utladningene sluttet å oppstå etter 16 timer