

Undersøkelse av hvordan vanninntrengning kan føre til havari av oljefylte kabeltermineringer

Geir Birkenes

Master i energi og miljø
Oppgaven levert: Juni 2010
Hovedveileder: Frank Mauseth, ELKRAFT

Oppgavetekst

Oljefylte høyspent kabeltermineringer finnes i et stort antall i kraftnettet både innen- og utenlands. Når en slik terminering feiler kan det forårsake alvorlige konsekvenser for personell nærheten samt betydelige KILE kostnader. Det er derfor et ønske om å kunne utvikle en måleenhet til et forenklet periodisk vedlikehold til slike kabeltermineringer for dermed å minske sannsynligheten for havari.

En mulig teori for hvorfor havariene har skjedd er at vann lekker inn i avslutningen gjennom forseglinger (o-ringer) og trekkes mot konusen hvor det elektriske feltet er høyest. Observasjoner av kabeltermineringen etter havari viser at gjennomslaget finner sted litt ovenfor konusen på kabelisolasjonen. Observasjoner av korrosjonsprodukter støtter også denne teorien som skal verifiseres i denne oppgaven.

Oppgaven går ut på eksperimentelt å undersøke hvordan vanninntregning kan føre til gjennomslag i oljefylte kabeltermineringer. Et fullskala eksperimentelt oppsett skal benyttes. Sammenheng mellom elektriske delutladninger, oljens fuktighetsinnhold og konduktivitet skal undersøkes. Forløpet til dråpene som beveger seg i installasjonen skal også filmes med et videokamera.

Oppgaven går ut på eksperimentelt å undersøke hvordan vanninntregning kan føre til gjennomslag i oljefylte kabeltermineringer.

Fokus for masteroppgaven vil være:

- bevegelse av vandrdåper i oljen
- lokalisering av partielle utladninger
- aldringsmekanismer

I tillegg vil SINTEF Energi kjøre forsøk på en fullskala kabelterminering med måling av PD, fuktighet og ledningsevne. Det er ønskelig at studenten også kjører målinger mot denne i løpet av oppgaven.

Oppgaven gitt: 15. januar 2010
Hovedveileder: Frank Mauseth, ELKRAFT

Forord

Denne oppgaven er den avsluttende masteroppgaven ved sivilingeniør utdanningen på NTNU. Oppgaven vektes 30 studiepoeng tilsvarende et semesters arbeid.

Arbeidet er utført ved institutt for elkraft teknikk i samarbeid med SINTEF Energi.

Jeg vil gjerne benytte sjansen til å takke min veileder på NTNU Frank Mauseth for all hjelp og god støtte under arbeidet. Han har vært meget behjelpelig og tilgjengelig langt utover hva som kan forventes. En stor takk rettes også til Sverre Hvidsten ved SINTEF Energi for gode innspill, ideer og diskusjoner rundt problemstillingene. Mine medstudenter på lesesalen har bidratt til en fin avslutning på studietiden.

Jeg kommer heller ikke utenom å takke min kjære samboer og familie som har motivert meg gjennom studietiden. Dere har lært meg verdien av kunnskap som har ført meg hit jeg er i dag.

Trondheim, juni 2010. Geir Birkenes

Sammendrag

Denne masteroppgaven er en del av et prosjekt finansiert av Forskningsrådet, Statkraft, Statnett, Nortroll og SINTEF Energiforskning samt flere E-verk. Hovedmålet i prosjektet er å utvikle måleutstyr som kan detektere fuktighetsnivå, fritt vann og konduktivitet i oljefylte kabeltermineringer i felt.

I den anledning er det interessant å skaffe mer kunnskap rundt hvilke fenomener som leder frem til havari. Det er flere hypoteser knyttet til hendelsesforløpet. Studier av havarerte termineringer viser at gjennomslagstedet ligger et stykke over konus. Ettersom det mest sannsynlige stedet for vanninntrengning er toppakningen antas at vannet glir ned langs kabelen og legger seg toppen av konus. Om vandrdåper alene vil kunne gi en stor nok feltforsterkning til at havari kan forekomme er usikkert. For å skaffe mer kunnskap om hendelsesforløpet gjennomføres følgende forsøk:

- Fullskalaforsøk av en vannlekkasje i en oljefylt kabelterminering. Målet med forsøket er visuelt å undersøke hvordan fritt vann i oljeisolasjonen vil bevege seg og etter hvert samle seg i termineringen. Underveis måles utladningsaktiviteten slik at den kan sammenlignes direkte med de observerte fenomener.
- Modellforsøket der det studeres hvordan en jordet vannfilm som ligger rundt kabelisolasjonen nederst i oljen vil påvirkes (visuelle observasjoner og utladningsmålinger) av det elektriske feltet. Forsøket utføres både med målinger like etter at spenningen er slått på og også som et aldringsforsøk.

Observasjoner gjort under fullskalaforsøket viser at dråpene har to karakteristiske bevegelsesmønstre. I tilfelle der dråpene har en viss avstand til andre dråper trekkes de inn mot konusområdet etter hvert som de synker nedover i oljen. Dersom to eller flere dråper kommer i nært nok slås det enten sammen eller støttes bort fra hverandre. Dråpene løser seg i liten grad i oljen, men fester seg på konus og veggene i termineringshuset.

Utladningsmålinger gjort under forsøket viste lite utladningsaktivitet de første 1400 timene selv om to liter vann ble dryppet inn i denne perioden. Fra 1400-2000 timer etter oppstart var utladningsnivået i området 50 pC-1nC. Utladningene ble lokalisert til neddel/ nedsiden av konus. Sammen med observasjoner kan dette tyde på at vandrdåpene har flyttet potensialet nedover konus ved å danne elektriske kontakt med oversiden.

Langtidsforsøk på modellkabler viste stor statistisk spredning på når havari inntreffer. Utladningsnivået ved relevante feltstyrker var også begrenset.

Innholdsfortegnelse

1	Innledning.....	1
1.1	Bakgrunn.....	1
1.2	Undersøkelse av havareert kabelterminering.....	2
1.3	Arbeid	3
2	Teori.....	5
2.1	Mekanismer som påvirker vannets bevegelse	5
2.1.1	Mekaniske krefter	5
2.1.2	Elektriske krefter	7
2.2	Partielle utladninger(PD)	10
2.2.1	Glide utladninger.....	11
2.2.2	Elektriske trevekst.....	12
2.2.3	Streamere i væske.....	13
3	Eksperimentell metode	15
3.1	Fullskala forsøk.....	15
3.1.1	Fullskala kabelterminering.....	15
3.1.2	Oppkobling	16
3.1.3	Prosedyre	17
3.2	Modellforsøk.....	18
3.2.1	Modell av kabelterminering.....	18
3.2.2	Oppkobling	20
3.2.3	Prosedyre	20
3.3	Målemetode	21
3.3.1	Konvensjonell PD måling IEC60270.....	21
3.3.2	Akustisk PD måling	21
4	Eksperimentelle resultater	23
4.1	Eksperiment 1: Fullskala test av oljefylt kabelterminering med vannlekkasje.	23
4.1.1	Observasjoner	23
4.1.2	Partielle utladninger(PD).....	28
4.1.3	Relativ fuktighet og temperaturmåling.....	34
4.2	Modellforsøk.....	35
4.2.1	Studie av forløp	35

4.2.2	Langtidsforsøk	37
5	Feltsimuleringer	41
5.1	Modeller og forenklinger	41
5.2	Resultater.....	43
6	Diskusjon	47
6.1	Feilkilder	51
7	Konklusjon	53
7.1	Forslag til videre arbeid	53
8	Bibliography.....	55

4 Vedlegg

1 Beregning av feltstyrker.

2 Oversikt over PD-plott.

3 Digitalt vedlegg.

4 Dimensjoner på konus.

1 Innledning

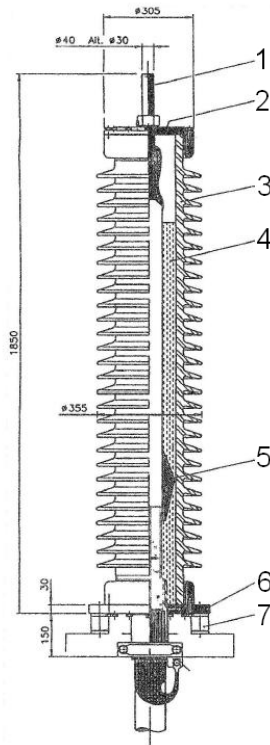
1.1 Bakgrunn

Det finnes et stort antall oljefylte kabeltermineringer i kraftnettet. Havarier av slike utgjør potensielt farlige situasjoner for personer som oppholder seg i nærheten. Det har forekommet at hele porselenshuset som omgir termineringen har eksplodert. Havarier vil også kunne resultere i betydelige KILE kostnader (kostnad for ikke levert energi) for nettoperatøren.

Det kan være ulike årsaker til at havariene oppstår. Tidligere arbeid[1] konkluderer med hovedsakelig tre årsaker til havari:

- Svakheter i konus eller kabel påført ved montasje eller selve produksjonen. Eksempler på dette kan være knivkutt, hakk eller urenheter.
- Vanninntrengning.
- Dårlig metallisk kontakt mellom toppbolt og kabel.

Arbeidet i dette prosjektet har utelukkende fokusert på å undersøke fenomenene som leder frem til havari i forbindelse med vanninntrengning. Figur 1 viser en skisse av en oljefylt kabelterminering.



Figur 1 Kabelterminering ETPU-6. 1 toppbolt, 2 topplate, 3 Porselenshus, 4 Silikon olje, 5 konus, 6 bunnplate, 7 støtteisolator.

1.2 Undersøkelse av havarert kabelterminering

Det mest sannsynlige stedet for en vannlekkasje er toppakningen. En klar indikasjon på at det har vært vann tilstedet er grønnfargingen på metallet som kommer av oksidasjon av kobberet. Dette er vist i Figur 2, der en tydelig kan se grønnfarging på undersiden av toppbolten.



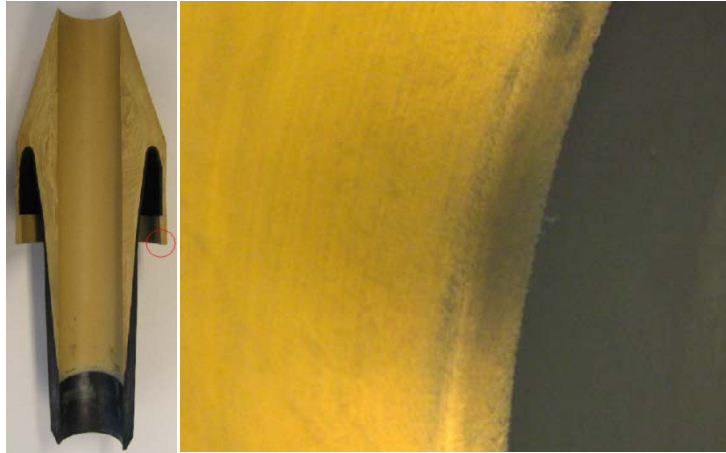
Figur 2 Toppbolt på havarert kabelterminering. Grønnfargen på bilde skyldes oksidasjonsprodukter fra kobber noe som er en klar indikasjon på tilstedeværelse av vann.

Videre undersøkelse av termineringen viser tracking langs isolasjonsoverflaten noe som indikerer at det har vært stor utladningsaktivitet. Det er særlig verdt å merke seg at tracking er i områder med normalt lav feltstyrke (langt under driftsfeltsyrke) som over konus. Eksempler på tracking som følge av utladninger er vist i Figur 3. Misfarging rundt havaristedet indikerer at det har vært høy temperatur.



Figur 3 Eksempler på tracking og gjennomslag[1].

Hva som må til for å initiere utladningsaktiviteten som vist over er usikkert. En teori er at vann samler seg på toppen av konus der det er en kant, og etter hvert danner en ledende kanal ned mot jordpotensialet på nedsiden av konus. I ytterste konsekvens vil da vannet kunne koble jordpotensialet direkte sammen med området på oversiden av konus. Dette vil føre til en endring i feltbilde og igjen lede til utladninger. Denne hypotesen underbygges av funn gjort på havarete termineringer der det er spor etter utladninger på konus.



Figur 4 Spor etter utladninger i nedkant av konus.

Erfaringsmessig finner selve gjennomslaget ofte sted et stykke over konus. Årsaken til dette er ikke klarlagt. En mulig teori basert på tidligere utført arbeid viser at vandrdåper blir påvirket av elektriske krefter og trekkes oppover kabelen [2].

1.3 Arbeid

Det eksperimentelle arbeidet i dette prosjektet har vært utført både på en fullskala oljefyllt kabelterminering og på modeller som presenteres nærmere i kapitel 3. Forsøkene har i hovedsak vært:

- Fullskalaforsøk av en vannlekkasje i en oljefyllt kabelterminering. Målet med forsøket er visuelt å undersøke hvordan fritt vann i oljeisolasjonen vil bevege seg og etter hvert samle seg i termineringen. Underveis måles utladningsaktiviteten slik at den kan sammenlignes direkte med de observerte fenomener.
- I modellforsøket ses det på hvordan en jordet vannfilm som ligger rundt kabelisolasjonen nederst i oljen vil påvirkes (visuelle observasjoner og utladningsmålinger) av det elektriske feltet. Forsøket utføres både med målinger like etter at spenningen er slått på og også som et aldringsforsøk.

Hovedfokuset i arbeidet med fullskala termineringen er å finne sammenhenger mellom målte utladninger og observasjoner av vandrdåpenes plassering. Hensikten med modellforsøket er å undersøke området der havariene typisk oppstår.

2 Teori

Den teoretiske tilnærmingen til denne oppgaven er todelt. Den ene delen har vært å studere hvordan frie vanndråper vil oppføre seg dersom de kommer inn i en oljefyllt kabelterminering, der de i tillegg til å bli påvirket av oljens egenskaper samt tyngdekraften, blir utsatt for et inhomogent elektrisk felt. Den andre delen har vært å studere de mekanismer som bryter ned isolasjonsmaterialet og på sikt leder frem til havari.

2.1 Mekanismer som påvirker vannets bevegelse

Mekanismene som virker inn på vannets bevegelse kan grovt grupperes i krefter som skyldes det elektriske feltet, mekaniske krefter og egenskaper ved væsken. For å forklare kreftene tas det utgangspunkt i Newtons 2. lov.

$$m \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \mathbf{F}_{\text{elektrisk}} + \mathbf{F}_{\text{gravitasjon}} + \mathbf{F}_{\text{væske}} \quad (2.1)$$

2.1.1 Mekaniske krefter

Oppdrift og gravitasjon

Tyngdekraft og forskjell i massetetthet resulterer i oppdriftskrefter som er gitt av:

$$\mathbf{F}_{\text{oppdrift}} = V(\rho_{\text{vann}} - \rho_{\text{olje}})\mathbf{g} \quad (2.2)$$

Der V er volumet av vanndråpen, \mathbf{g} er tyngdeakselerasjonen og ρ er tettheten til henholdsvis vann og olje, se egen merking.

Dragkrefter

Dragkrefter er krefter som virker i motsatt retning til den relative bevegelsen av et objekt i et fluid (væske eller gass). En karakteristisk egenskap ved dragkrefter er at de er avhengig av legemets hastighet. Dragkreftene er gitt av [2]:

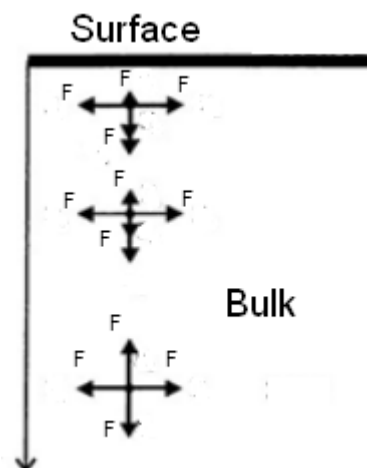
$$\mathbf{F}_{\text{drag}} = \frac{1}{2} \rho C_d A |u - v| (u - v) \quad (2.3)$$

Der ρ er fluidets tetthet, C_d er drag koeffisienten som er basert på eksperimentelle resultater, u og v er hastigheten til henholdsvis olje og vandråpen. I tilfeller med lave Reynoldstall¹ ($R < 1$) og kuleformede legemer kan uttrykket for dragkraften skrives som:

$$\mathbf{F}_{drag} = 6\pi\eta_{oil}r(u-v) \quad (2.4)$$

Overflatespenninger

Frie vandråpers oppførsel i olje vil bli sterkt påvirket av overflatespenninger. Overflatespenninger er en egenskap ved væsker som gir seg gjeldene ved overflaten. Årsaken til overflatespenninger kan forklares på molekylært nivå. Mellom molekylene i en væske virker det intermolekylære krefter, for molekylene inne i væsken vil summen av disse kreftene bli null ettersom hvert enkelt molekyl trekkes like mye i alle retninger. Nært overflaten vil molekylene trekkes mer innover i væsken enn ut mot overflaten. Fenomenet er illustrert med kraftvektorer på Figur 5.



Figur 5 Kraftvektorer på molekyler nært overflaten på en væske[3].

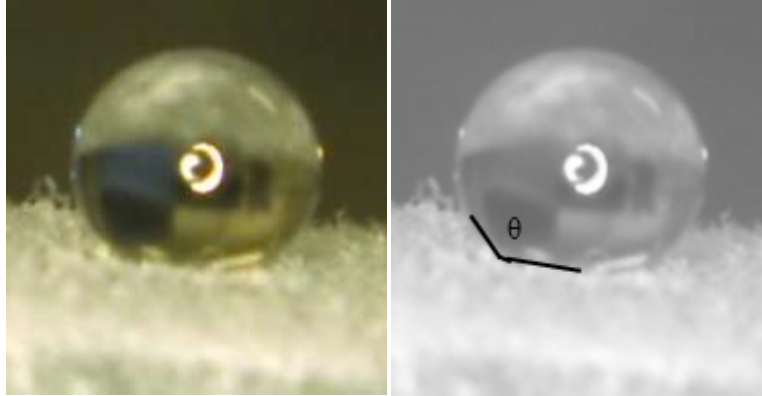
Som vist på figuren vil det tilsynelatende være en nettokraft ved overflaten som virker innover i væsken. I følge Newtons lov vil da væskemolekyler nært overflaten bli akselerert inn i væsken. Det som isteden skjer er at overflaten krummes. Som en konsekvens av disse kreftene oppstår det en trykkforskjell over overflaten gitt av Young-Laplace ligningen [5]:

$$\Delta p = \gamma \left(\frac{1}{r_x} + \frac{1}{r_y} \right) \quad (2.5)$$

For en symmetrisk dråpe der $r_x = r_y$ kan dette forenkles til $\Delta p = \frac{2\gamma}{r}$. Der r er radien av flaten og γ er overflatespenningen. Enheten for overflatespenninger er N/m.

¹ Reynoldstall er definert som $Re = \frac{\rho v D}{\mu}$ der v er middelhastighet, D er diameter over legemet og μ er viskositeten [21]. Strømningsprofilen er gitt av reynoldstallet.

En dråpe som legger seg på en overflate blir påvirket av både materialet og det omkringliggende mediet. Slik at overflate spenningen er avhengig av flere faktorer enn kun væsken. Kontaktvinkelen [6] er definert som tangenten væske overflaten har til det faste materialet. Denne vil være avhengig av hvordan overflaten er behandlet og overflatens materialegenskaper. Et eksempel er vist Figur 6.



Figur 6 Vanndråpe på grovpusset PEX-overflate. Her er kontakt vinkelen over 90° .

2.1.2 Elektriske krefter

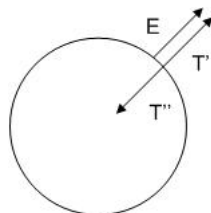
Det finnes flere ulike modeller som beskriver de elektriske kreftene som virker mellom vanndråper i et elektrisk felt. Generelt kan kreftene uttrykkes ved Maxwells stresstensorer:

Maxwells stresstensor

Dersom en ledende vanndråpe kommer inn i et elektrisk felt vil det virke mekaniske krefter på overflaten. Dette kan beskrives generelt ved Maxwell stresstensor[6]:

$$\mathbf{T} = \mathbf{T}' + \mathbf{T}'' = (\mathbf{D}\mathbf{n})\mathbf{E} - \frac{1}{2}(\mathbf{D}\mathbf{E})\mathbf{n} \quad (2.6)$$

For en ledende partikkel vil det elektriske feltet stå normalt på overflaten, krafttensorene vil da trekke vinkelrett på dråpens overflate. Retning på vektorene er vist på Figur 7.

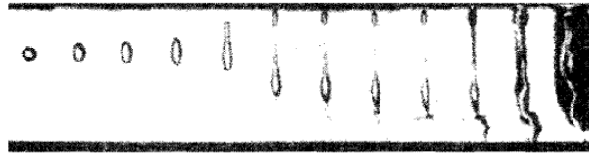


Figur 7 Vektorene merket T og E viser retningen på hhv krefter og elektrisk felt. Figuren gjelder for en ledende partikkel.

Den resulterende kraften som virker på overflaten finnes ved å integrere over arelaet[6]:

$$\mathbf{F}_{\text{elektrisk}} = \int_A \mathbf{T} dA = \int_A \frac{1}{2} \mathbf{D}\mathbf{E}\mathbf{n} dA = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r}{2} \int_A E^2 \mathbf{n} dA \quad (2.7)$$

Der ϵ_r og ϵ_0 er permittiviteten i henholdsvis relativ og i vakuum, E er feltstyrken og n er normalvektor på overflata. Dersom en kuleformet dråpe plasseres i et homogent felt vil det trekkes like mye på hver side av dråpen og summen av kreftene som virker vil være null. Ettersom vanndråpen ikke er stiv vil kreftene deformere dråpen. Figur 8 illustrerer virkning av disse kreftene.



Figur 8 Vanndråpe i olje eksponert for et homogent elektrisk felt. Kreftene trekker på begge sider av dråpen[19].

Kraftvirkning på vanndråper i elektrisk felt

For å beskrive hvilke krefter som virker på nøytrale vanndråper i et ikke-homogent felt tas det utgangspunkt at vanndråpene polariseres i det elektriske feltet slik at dråpen kan betraktes som en dipol. Modellen bygger på at dipolen ligger plassert i sentrum av dråpen. Tilnærmingen refereres til som "point-dipole approximation" (PDA) [7].

Generelt er den resulterende elektriske kraften som virker på dråpen gitt av[7]:

$$\mathbf{F}_{\text{elektrisk}} = \mu \Delta E_0 \quad (2.8)$$

Der μ er dipolmomentet og E er det elektriske feltet. Videre antas det at vannet er et perfekt dielektrikum med definert relativ primitivitet og ikke er ledende. For en enkel liten dråpe i et inhomogent elektrisk felt vil da dipolmomentet μ kunne skrives som[8]:

$$\mu = 2\pi r^3 \epsilon_0 \epsilon_{\text{olje}} \frac{\epsilon_{\text{vann}} - \epsilon_{\text{olje}}}{\epsilon_{\text{vann}} + 2\epsilon_{\text{olje}}} E_0 \quad (2.9)$$

Innsatt i (2.8) gir dette følgende:

$$\mathbf{F}_{\text{elektrisk}} = 2\pi r^3 \epsilon_0 \epsilon_{\text{olje}} \frac{\epsilon_{\text{vann}} - \epsilon_{\text{olje}}}{\epsilon_{\text{vann}} + 2\epsilon_{\text{olje}}} \nabla E_0^2 \quad (2.10)$$

Der E_0 er den elektriske feltstyrken og $\epsilon_{\text{olje,vann}}$ er permittiviteten i henholdsvis olje og vann. I litteraturomtales fenomenet som dielektroforese(DEF) og har følgende egenskaper [8]:

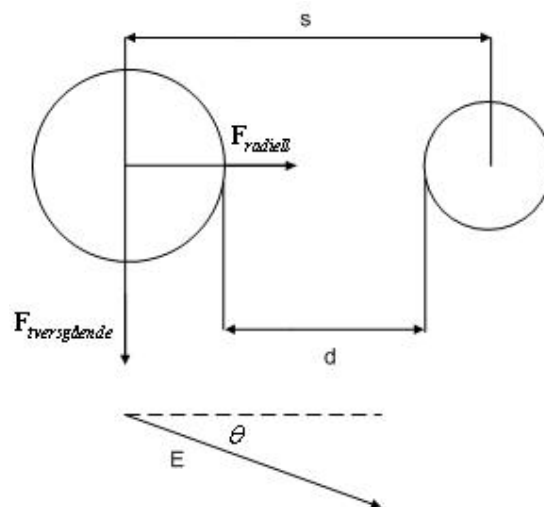
- Partikler opplever DEF kun når det elektriske feltet er inhomogent.
- DEF kraften er uavhengig av retningen til det elektriske feltet og observeres både ved AC og DC felt.

- Når en partikkel opplever DEF trekkes den mot området der feltet er sterkest dersom partikkelens permittivitet er større enn permittiviteten til mediet den befinner seg i. I motsatt tilfelle vil partikkelen trekkes mot området der feltet er svakere.

Dersom det er flere vanndråper tilstedet, vil det virke elektrostatiske krefter mellom dipolene. Disse kreftene er det vanlig å dekomponere i en tversgående og radiell komponent (relatert til dipolen som forenklet antas å ligge midt i vanndråpen). Kraftene er gitt av [7]:

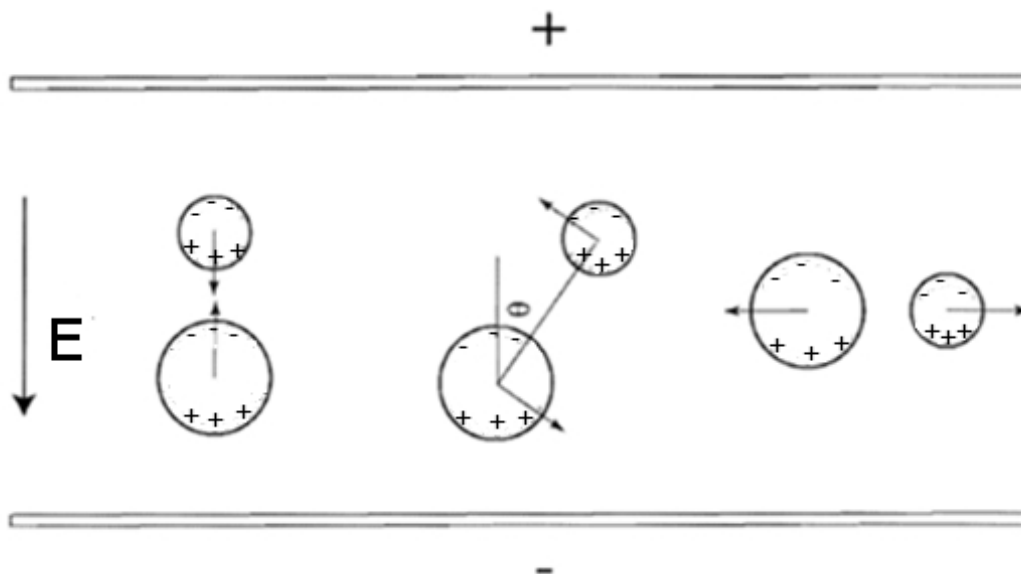
$$\begin{aligned} \mathbf{F}_{\text{radiell}} &= \frac{12\pi\epsilon_{\text{vann}}\epsilon_{\text{olje}}r_1^3r_2^3E_0^2}{s^4} [3K_1 \cos(\theta)^2 - 1] \\ \mathbf{F}_{\text{tversgående}} &= \frac{12\pi\epsilon_{\text{vann}}\epsilon_{\text{olje}}r_1^3r_2^3E_0^2}{s^4} K_2 \sin(2\theta) \end{aligned} \quad (2.11)$$

Der r_1 og r_2 er radiusen i de to dråpene, avstandene s og d er vist på Figur 9. E er det elektriske feltet og θ er vinkelen mellom det elektriske feltet og den radielle kraften. Konstantene K_1 og K_2 er relatert til dråpens form og kan for denne tilnærmingen settes ≈ 1 .



Figur 9 Krefter mellom to dråper

Dråpenes posisjon i forhold til hverandre vil avgjøre om kraften er tiltrekkende eller frastøtende. I Figur 9 vises eksempler på tiltrekning og frastøtning avhengig av vinkelen mellom dråpene og plassering av ladningen.



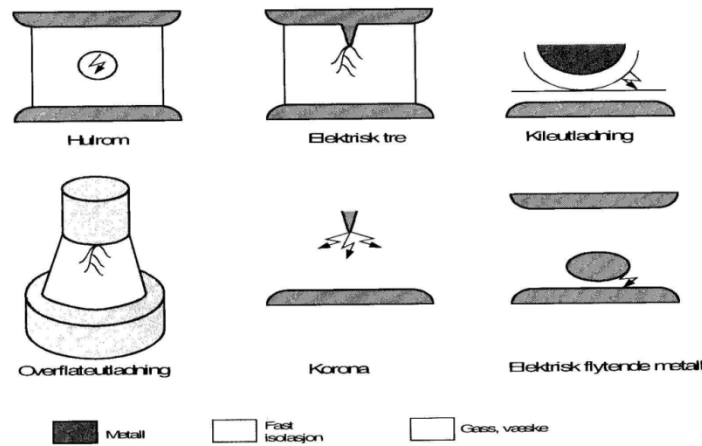
Figur 10 Eksempler på tiltrekning og frastøtning av to dråper avhengig av posisjon[6].

2.2 Partielle utladninger(PD)

Partielle utladninger brukes som et samlebegrep på fenomener som kjennetegnes ved at det oppstår et lokalt elektrisk sammenbrudd i isolasjonen. Dette skjer fordi det elektriske feltet lokalt blir så høyt at holdfastheten overskrides. Utladningene kan finne sted på ulike steder i isolasjonen. Eksempler på dette er hulromsutladninger og utladninger som finner sted rundt fremmedlegemer i isolasjonen. Andre utladninger kan kjennetegnes ved at de skjer på utsida av isolasjonen. Dette skjer typisk på steder der gradienten til det elektriske feltet er høy, som i overgangen mellom to materialer.

Avhengig av hvilken type isolasjon og isolasjonssystem som er brukt vil PD kunne lede frem til havari. Det er derfor svært viktig å ha kunnskaper om hvilke utladningsnivåer som er akseptable, hvorfor utladningene oppstår og hva som kan gjøres for å unngå dette. Ulike materialer har ulik evne til å motstå utladninger. For PEX- kabler kan selv små utladninger over tid bryte ned isolasjonen. Nye PEX-kabler spenningsprøves i fabrikk i henhold til NEK395 der øvre akseptable utladningsgrense er 10 pC[9].

Avhengig av geometri og signatur kan utladningene grupperes. En grov inndeling kan være som vist i Figur 11.

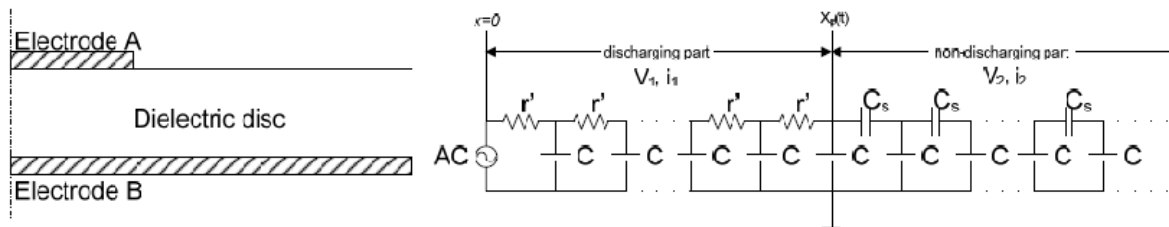


Figur 11 Ulike typer partielle utladninger[9].

Her ses det nærmere på glideutladninger(overflateutladninger) og elektriske trevekst, samt en kort beskrivelse av gjennomslag i olje. For mer inngående beskrivelser av andre typer partielle utladninger henvises det til litteraturen[9].

2.2.1 Glideutladninger

Ved høye tangentielle felpåkjenninger vil en alltid kunne forvente å få glideutladninger langs overflaten. Kapasitansen $C_s \gg C$ (se Figur 12 for forklaring), dette fører til at spenning i all hovedsak vil ligge over C . Dette vil føre til høy påkjenning i området nært elektrode A(på Figur 12)som igjen vil føre til en ionisering av det omkringliggende mediet slik at dette blir ledende. Til høyre i Figur 12 viser en kretsekvivalent av en glideutlading.

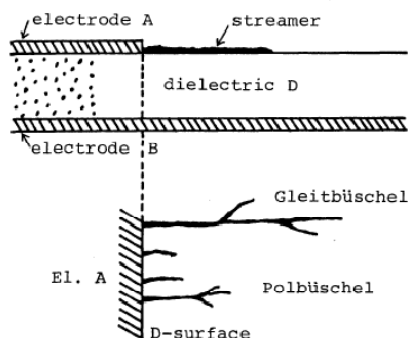


Figur 12 Kretsekvivalent med konsentrerte parametere av en geometri med overflate glideutlading. r' symboliserer motstanden i streameren, C_s er kapasitansen langs med overflata og C er kapasitansen i dielektrikumet.

Det elektriske feltet er størst i grenseflaten mellom elektrode A, dielektrikumet og det omkringliggende mediet(eksempelvis luft), slik at utladningen vil starte her og bre seg utover når tennspenning nås.

Dersom den påtrykte spenningen økes etter at tennspenning er nådd vil utladningene gradvis endre karakteristikk. De første observerte utladningene beskrives i litteratursom koronautladninger som brer seg utover langs overflaten med en utstrekning fra 1-2 cm[10]. Når spenning blir høy nok endres karakteristikken til utladningene og en får en overgang til børsteutladninger. Børsteutladningene brer seg langt mer utover enn koronautladningene

[11] og vil i løpet av kort tid skade isolasjonsmaterialet. De samme fenomenene beskrives også som overgangen "polbüschel-gleitbüschel". Fenomenet er illustrert i Figur 13.



Figur 13 Glideutladninger[11].

2.2.2 Elektriske trevekst

Kort oppsummert kan et elektrisk tre beskrives som et nettverk bestående av karboniserte og gassfylte kanaler i fast elektrisk isolasjon. Et elektrisk tre vil vanligvis forgreine seg fra en feltforsterkning i isolasjonen(eksempler på slike feltforsterkninger er hulrom, forurensing eller en utvendig skade.).

Selve forløpet til elektrisk trevekst deles gjerne inn i to stadier: initieringsperiode og vekstperiode.

Initieringsperiode:

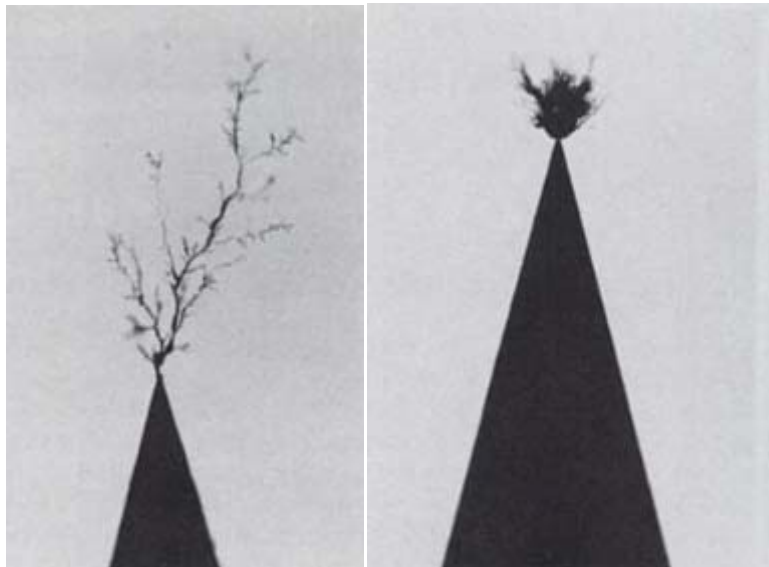
Initieringsperioden beskriver tiden det tar fra spenning påtrykkes og frem til det dannes et hulrom(start av en kanal)[12]. I laboratoriestudier av elektriske trær har det vært påvist lysutsendelse uten deteksjon av partielle utladninger i forbindelse med initiering[13]. Årsaken er at lysutsendelsen skyldes ikke utladninger, men derimot elektroluminescens som er en prosess der elektroner gjennomgår en rekombinasjon som frigir energi i form av fotoner. Det er ikke klart å etablere noen sammenheng mellom hvilket spenningsnivå lyset observeres på og selve degraderingen av materialet[13].

For at initiering skal starte er det nødvendig med høyt lokalt elektrisk felt, i drift kan slike feltstyrker typisk oppstå rundt forurensninger i isolasjonsmaterialet eller ved lederen der den er skadet og har ujevnheter.

Vekstperiode:

I litteratur beskrives veksten av elektriske trær som en prosess drevet frem av partielle utladninger [15]. Felt påkjenningen i spissen av kanalen vil bli større en den lokale holdfastheten slik at et indre gjennomslag inntreffer. Slik vil utladningene gradvis bryte ned

isolasjonsmaterialet. Kanalenes utforming lengde(l)/bredde(b) vil være avhengig av flere parametere som isolasjonsmaterialet og spenning.

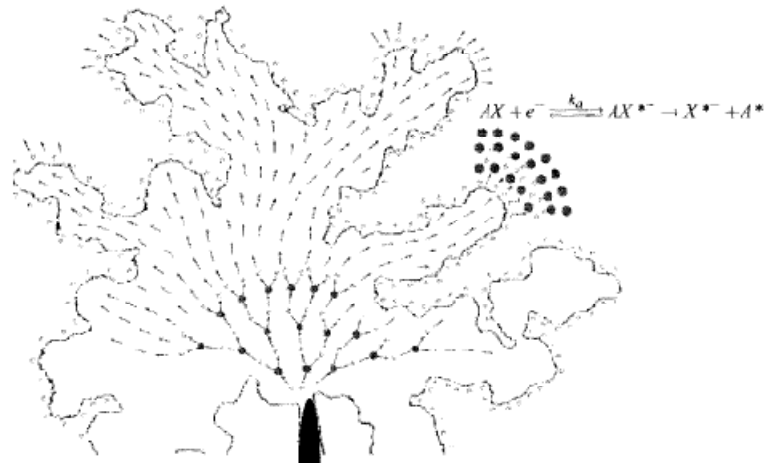


Figur 14 Eksempler på ulike former for elektrisk trevekst[14]. Isolasjonsmaterialet er en epoksi resin.

Figur 14 illustrer to ulike typer av elektrisk trevekst. Treet til venstre i figuren er typisk grenformet (stor l/b), mens treet til høyre har en mer buskelignende form (lav l/b). Generelt bruker et "busktre" lengre tid på å vokse.

2.2.3 Streamere i væske

Det finnes ingen entydig akseptert teori som beskriver mekanismene som leder frem til elektrisk sammenbrudd i væsker. En av årsakene til dette er at væsker aldri vil være helt rene. Det vil alltid være spor av forurensing som vil påvirke den elektriske holdsfastheten. For å beskrive mekanismene trekkes det i litteraturen analogier til en utvidet tolking av gassmodellen [16]. Fenomenene som leder frem til sammenbrudd i gasser kalles gjerne streamere. Dette brukes også om væsker. Særlig to streamerforløp er omtalt i litteratur referert til som første og andre negativ streamer (kvalitative modeller for positive streamere er sjelden omtalt). Den første kjennetegnes ved sakte fremdrift. For å beskrive denne tas det utgangspunkt i en dampboble med gjentatte indre spenningsammenbrudd (PD). Utladningene vil produsere frie elektroner som vil treffe væskefasen foran dampbobla og bidra til ytterligere fordamping. Den andre typen kalles raske streamere. For å beskrive disse benyttes en rekursiv modell. Denne bygger på at frie elektroner blir fanga i væska ved at det dannes negative ioner. Disse romladningene setter opp et elektrisk felt som ioniserer væska når feltstyrken blir stor nok. Prosessen gjentas fortløpende etter hvert som nye elektroner kommer til. Streamerne slukker når det elektriske feltet blir lavt nok. En kan da se en "sti" av mikroskopiske bobler som løser seg i væsken.



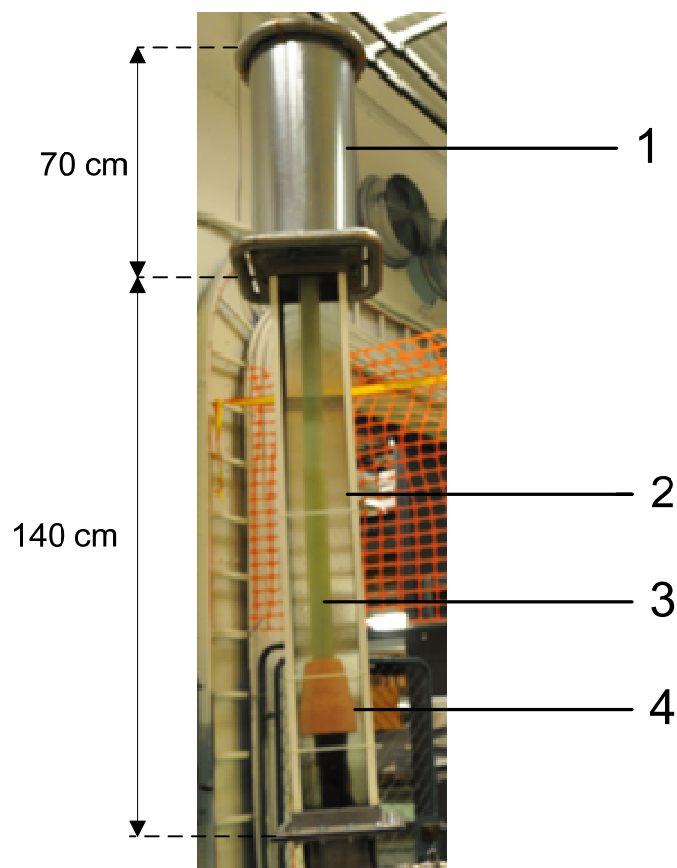
Figur 15 Sakte negativ streamer[15].

3 Eksperimentell metode

I dette kapitlet beskrives de praktiske oppsettene og prosedyrene. Det skilles mellom forsøkene som er utført på modeller og fullskalaforsøk. Det brukes samme olje i alle forsøk, AK100 100CST.

3.1 Fullskalaforsøk

3.1.1 Fullskala kabelterminering



Figur 16 Fullskala terminering brukt under forsøkene. 1 topphus, 2 pleksiglasshus, 3 PEX-kabel, 4 kabelkonus.

Vannposene som brukes for å dryppe inn vannet plasseres i topphuset. Oljen tappes inn i pleksiglasshuset. Grunnen til å bruke pleksiglass fremfor kompositt eller porselen som brukes i felt, er å kunne observere hva som skjer inne i termineringen. Av samme årsak er også firkantet design foretrukket. Kabelen som benyttes i arbeidet er en 145 kV 1x400 mm² Al kabel levert av Alcatel(nå Nexans).

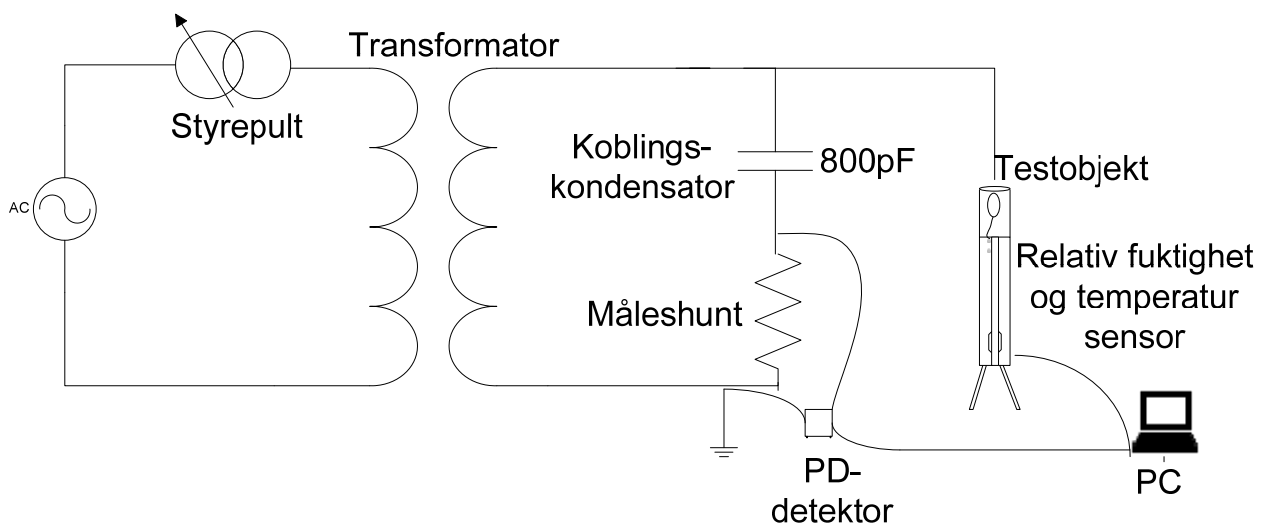


Figur 17 Pose brukt til drypping av vann.

Figur 17 viser vannposen som ble brukt under forsøkene. Dråpehastigheten reguleres ved å regulere på slangeklypen som henger på slangen (oransje). Slangen trekkes gjennom toppakningen og plasseres tett inntil kabelen slik at dråpene kommer nærmest mulig kabelisolasjonen. Det ble benyttet deionisert vann med en ledningsevne på $5,49 \cdot 10^{-10}$ S/m.

3.1.2 Oppkobling

Den eksperimentelle oppkoblingen for testing av en fullskala kabelterminering med vannlekkasje er vist i Figur 18. Oppkoblingen består av transformator, styrepult, koblingskondensator, testobjekt og utstyr for måling av partielle utladninger (PD).



Figur 18 Skisse av målekrets for fullskalaforsøk.

3.1.3 Prosedyre

Hensikten med forsøket er å undersøke hva som skjer inne i en kabelterminering ved vannlekkasje. For at dette skal gjøres så realistisk som mulig dryppes vannet inn i termineringen. Forsøket ble gjennomført etter følgende prosedyre:

- Vannet dryppes inn i termineringen 500 ml pr. pose. Dryppetiden er omtrent 12 timer.
- Tiden mellom hver dryppeperiode varierer fra 7-14 døgn. Denne prosedyren følges frem til vannmengden i termineringen er 2 liter.

Hovedfokus i arbeidet er å se etter sammenhenger mellom målte utladninger og hvordan vannet akkumuleres i termineringen. Det måles partielle utladninger underveis, målingene logges med en oppløsning på 1 time. Loggingen av utladningene er i perioder ikke kontinuerlig. Dette skyldes at måleenheten drives med batteri med begrenset varighet. Alternativet til å bruke batteri er å bruke en DC kilde som forsynes fra nettet denne fører til at følsomheten i målingene begrenses (økende støygrense). Denne løsningen er foretrukket i perioder der det ikke er nødvendig med høy følsomhet.

3.2 Modellforsøk

3.2.1 Modell av kabelterminering

For å gjøre forsøkene så realistiske som mulig er det nødvendig at feltstyrken på isolasjonsoverflaten er den samme på modellen som på fullskala kabler. Merk at feltstyrke referer til driftsfeltstyrken på PEX-overflaten i vanlig drift. Det har derfor blitt utarbeidet en oversikt over feltstyrken i fullskala kabler og spenningen som påtrykkes modellen. Oversikten er vist i Tabell 1. Beregningene finnes i vedlegg 1.

Tabell 1 Driftsfeltstyrke på PEXoverflaten. Feltstyrkene er beregnet ved påtrykt 132 kV linjespenning.

Tverrsnitt[mm ²] ²	Feltstyrke[kV/mm]	Påtrykt spenning i modell[kV]
630	3,32	15,7
800	3,43	16,2
1000	3,51	16,6
1200	3,56	16,9
1600	3,67	17,4

Sammenhengen mellom påtrykt spenning og feltstyrke på isolasjonsoverflaten i modellkabelen er vist i Tabell 2.

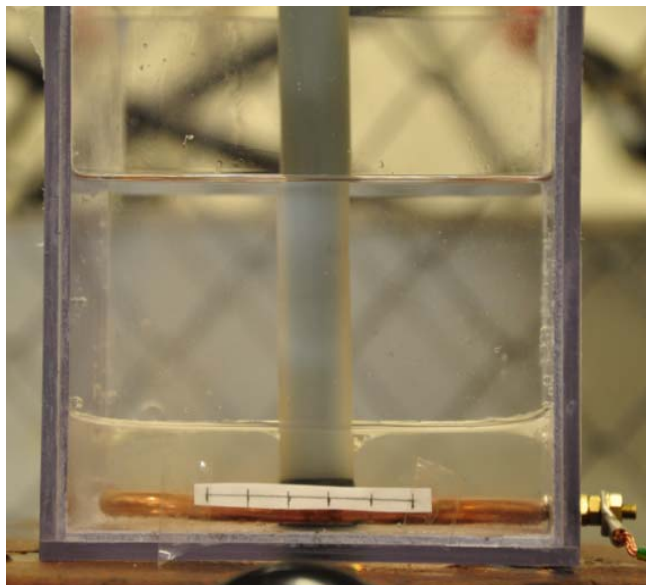
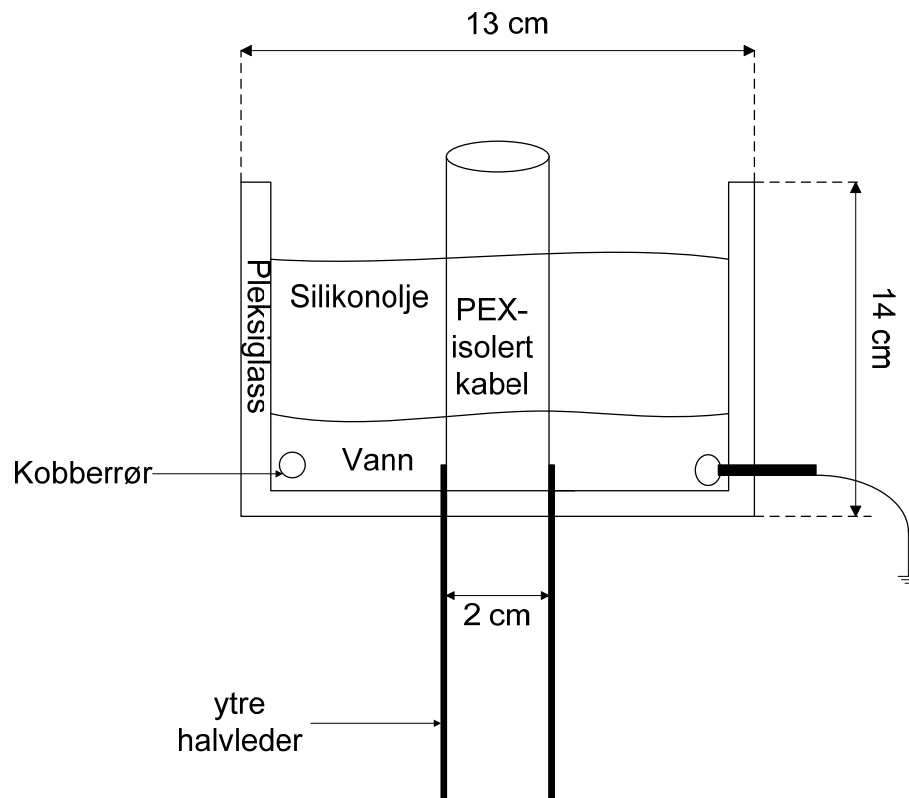
Tabell 2 Feltstyrke som funksjon av påtrykt spenning

V[kV]	3	6	9	12	15	18	21
E[kV/mm]	0,63	1,27	1,90	2,54	3,17	3,80	4,43

Modellen fylles med vann(deionisertvann tilsatt NaCl) og silikonolje(AK100) som illustrert i Figur 19. Modellen tres så over kabelen slik at avslutningen av ytre halvleder er ca 1 cm inn i vannet og omtrent 2-3 cm fra oljen(se Figur 19). Vannfilmen jordes via et kobberør som ligger er lagt nederst i termineringen.

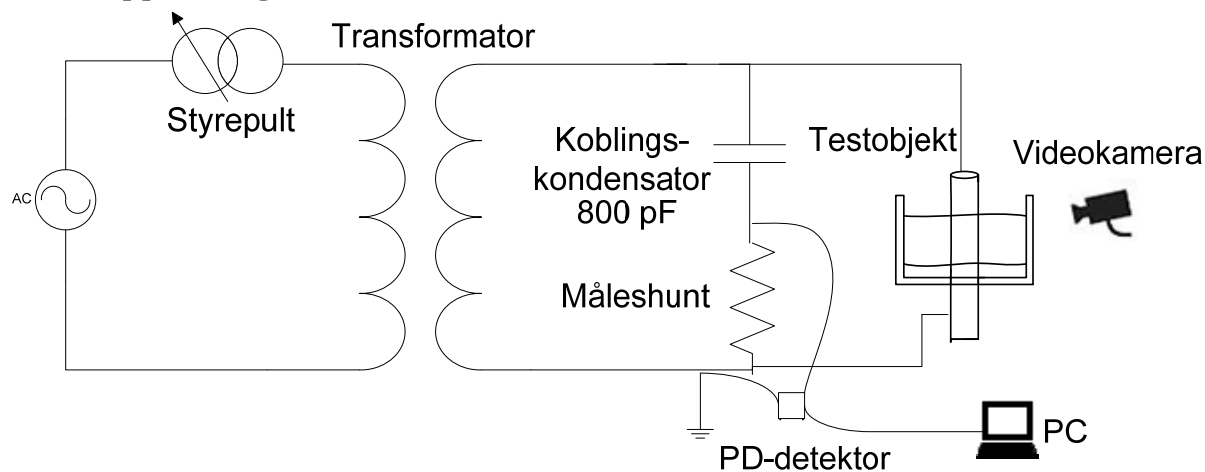
Kablene som benyttes er 12 kV PEX-kabler, lederdiameter er 11,5 mm og diameter overisolasjonen(med ytre halvleder fjernet) er ca 19 mm. Ytre halvleder freses av med spesiallaget maskin.

² Alle dimensjoner brukt i beregningene er henta fra Kabelboka[18]. Fremgangsmåte brukt ved beregning av feltstyrker er vist i vedlegg 1.



Figur 19 Modell av kabelterminering fylt med vann og silikonolje.

3.2.2 Oppkobling



Figur 20 Oppkobling modellforsøk.

3.2.3 Prosedyre

Følgende forsøk utføres på modellene:

Studie av forløp

Modellforsøkene er først og fremst en studie av området som gir havari. I dette forsøket studeres det hvordan vannfilmen påvirkes av det elektriske feltet fra kabelen og hvordan dette kan kobles til måling av partielle utladninger. Spenningen oppgis som det elektriske feltet på isolasjonsoverflaten. For modellkabelen er denne sammenhengen gitt av Tabell 2.

Langtidsforsøk

I langtidsforsøket kjøres fem parallelle modeller med spenning på 18 kV som omtrent tilsvarer driftfeltstyrke jamfør Tabell 1. Hensikten med forsøket er som følger:

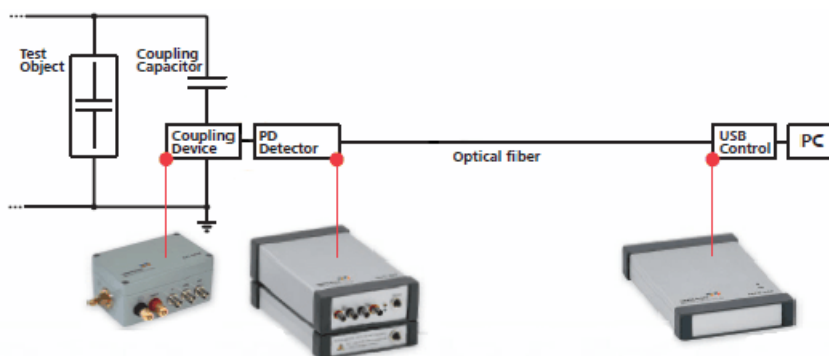
- Sammenligning av skader på isolasjonen i modellkablene med havarerte termineringer i felt vil kunne gi en god indikasjon på hvor realistiske modellene er.
- Forsøket vil gi kunnskap om når en kan forvente havari etter at kabelisolasjon og jordpotensial er koblet sammen.

I perioder måles det utladninger på den ene kabelen.

3.3 Målemetode

3.3.1 Konvensjonell PD måling IEC60270

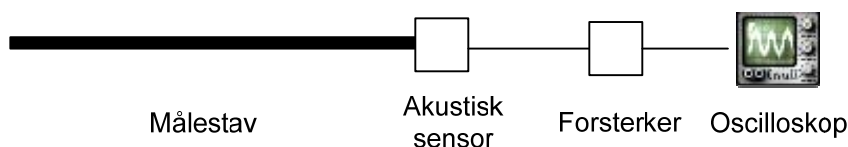
For å måle partielle utladninger ble det brukt et PD måleutstyr fra *Omicron(MPD600)*. Oppkobling av utstyret er vist i Figur 21. Støygrensa på målingene er ca 5 pC i modellforsøket. Målingene tilknyttet fullskalaforsøket har ulik støygrensene avhengig av hvilken strømforsyning som benyttes til PD-detektoren (batteri eller tilførsel fra nettet), støygrensene er henholdsvis 8 pC og 15 pC. Det henvises til litteratur for nærmere beskrivelse av teori[9] knytta til PD-måling.



Figur 21 Skisse av målekrets for partielle utladninger[16].

3.3.2 Akustisk PD måling

På fullskala termineringen brukes akustisk måling for å kunne detektere hvor utladningene finner sted. Prinsippet bak akustisk pd måling er at utladningene sender ut lyd. Dettet detekteres av sensor som omgjør signalet til et spenningsignal. Ulempen med denne måleteknikken er at signalene fort dempes ut. Det er heller ikke mulig å kalibrere disse målingene. For å sikre reproduserbarhet av resultatene føres målestaven vinkelrett inn på pleksiglassoverflaten (se Figur 16 for bilde av terminering) med treffpunkt midt på overflata. På grunn av tilgangen til måleobjektet utføres deteksjonen kun på en side av termineringen.



Figur 22 Prinsipp for akustiskmåling av partielle utladninger.

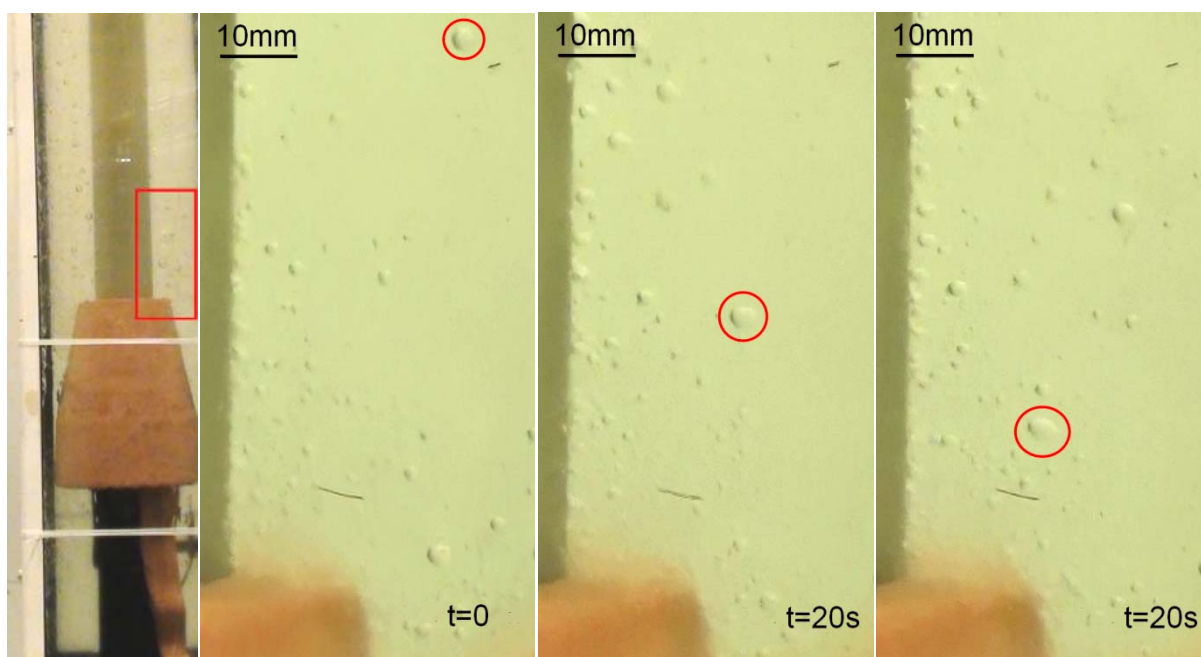
4 Eksperimentelle resultater

I dette kapitlet presenteres de eksperimentelle resultatene fra labforsøkene utført i dette prosjektet. Det skilles mellom forsøk gjennomført på modellkabler og fullskalaforsøk.

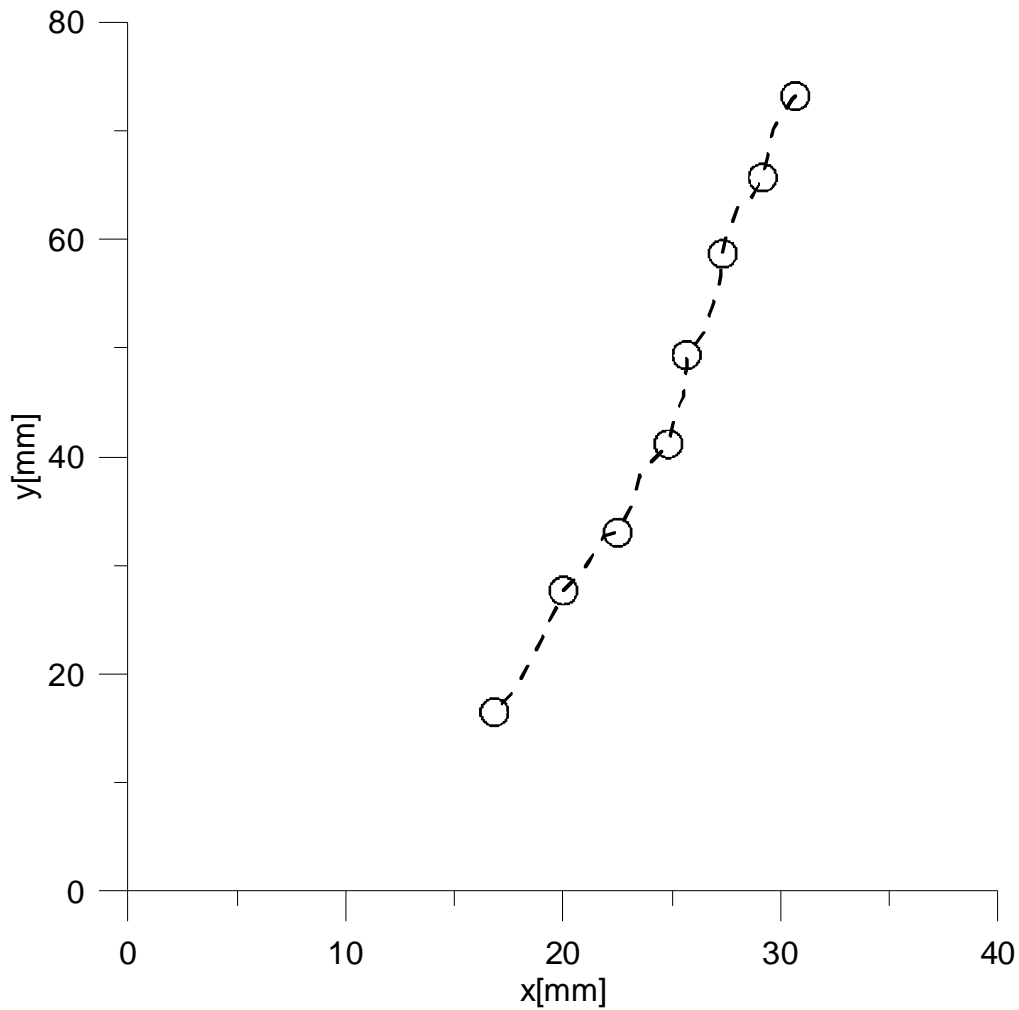
4.1 Eksperiment 1: Fullskalatest av oljefyllt kabelterminering med vannlekkasje.

4.1.1 Observasjoner

Vanndråpene ble tilført over oljen helt inne ved PEX-isolasjonen. Dråpene sank gradvis nedover i oljen som følge av større tetthet. Trenden viser at så lange dråpene har en viss avstand til hverandre trekkes de inn mot kabelen. Dette gjelder også dråper som i utgangspunkt er flere cm unna kabelen. Dette er vist i Figur 23 og Figur 24. Den innringede dråpen i Figur 23 har en diameter på omtrent 3,3 mm.



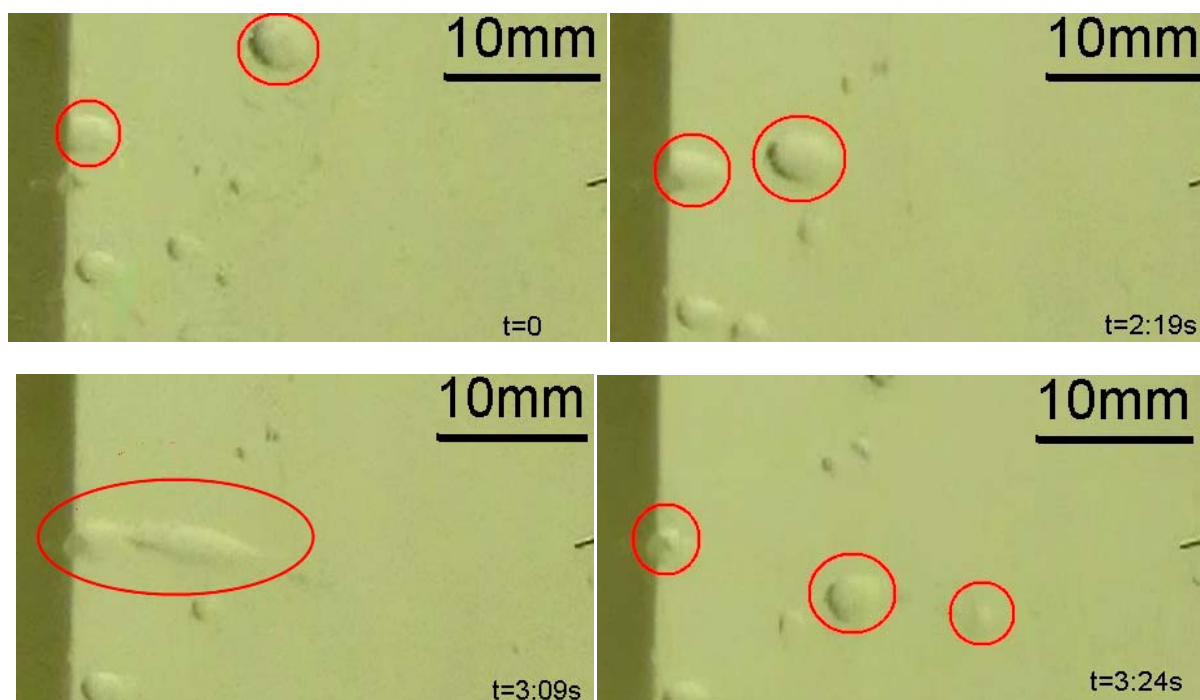
Figur 23 Dråpe bevegelse i olje. Tidsforskjellen mellom bildene er angitt på figuren. Dråpens størrelse er omtrent 3,3 mm i diameter.



Figur 24 Dråpens posisjon relativ til topp av konus(helt inne ved kabelisolasjonen). Plottet er basert på bilder plottet med 1 sekunds oppløsning og det er 4 sekunder mellom hver inntegnede sirkel.

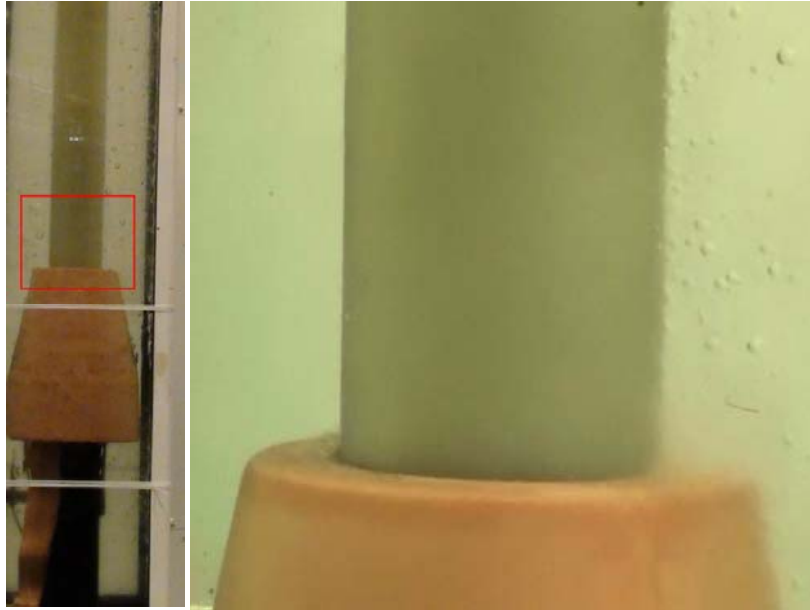
Figur 24 illustrerer hvordan en synkende dråpe endrer posisjon både i x og y retning. Avstanden mellom sirklene(hastigheten) er størst når dråpen er nærmest konus.

Etter hvert som det ble flere dråper er tendensen at dråpen vekselvis trekkes sammen eller støttes fra hverandre. Eksempel på frastøting er vist i Figur 25. En del av dråpene trekkes helt ut til pleksiglasset og fester seg på overflaten. Tettheten av dråper på pleksiglasset blir etter hvert stor(nærmest som en heldekkende vannfilm). Dråpene endrer i liten grad posisjon når spenningen slås av(termineringen sto spenningsløs i 2 timer).



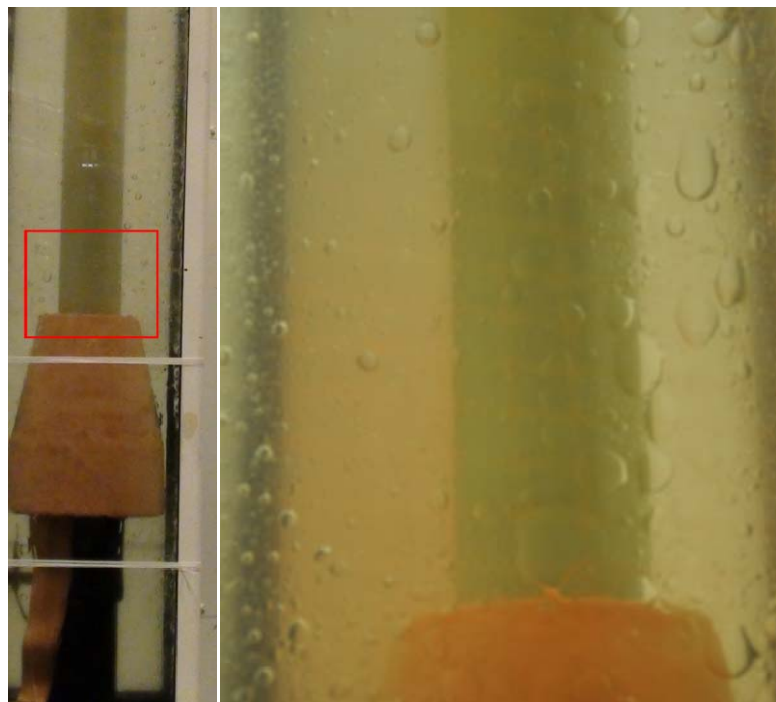
Figur 25 Dråper frastøter hverandre. Dråpen som henger inne ved kabelen ligger 67 mm over toppen av konus. Diameteren på dråpene er henholdsvis 3,5 mm og 2,5 mm.

Figur 25 viser hvordan dråpene støttes fra hverandre når avstanden mellom dem blir liten nok. Dråpen som beveger seg inn mot kabelen blir påvirket av det elektriske feltet slik at den strekkes. På bilde t=0 er den innringa dråpen lengst vekk fra kabelen rundt og har diameter på ca 3,5 mm, ved t=3:09s er dråpen strukket slik at lengden er 7 mm. Ved t=3:24s har dråpen blitt støtt bort fra kabelen, kraftvirkningen har delt dråpen i 2 mindre dråper. De kan også se ut som om dråpen inne ved kabelen delvis har slått seg sammen med dråpen som ble støtt bort. Grunnet tidsoppløsningen på videobildene er det vanskelig å fastlegge hendelsesforløpet helt nøyaktig.



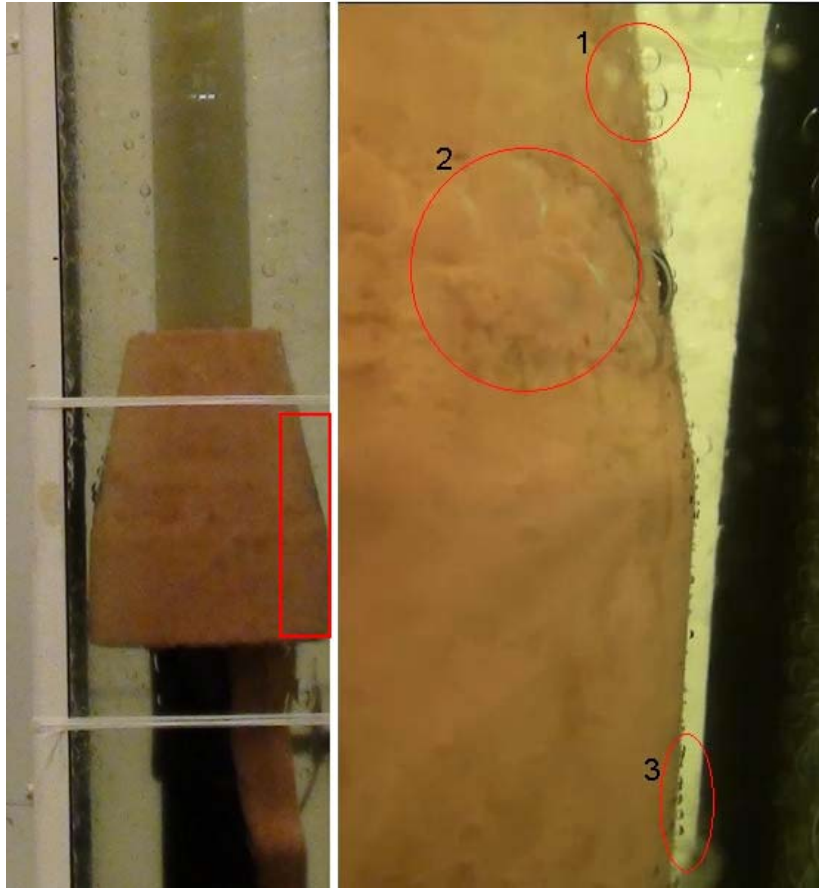
Figur 26 Oppdeling av dråper ved konuskant. Bilde tatt under inndrypning av 1. vannpose

Etter hvert som dråpene nærmet seg toppen ble de delt i opp i stadig mindre dråper. Som vist i Figur 26 var fenomenet klart mest synlig på toppen av konus, men det ble også observert samme tendens på nedsiden av konus. De små dråpene bredte seg utover i oljen som en tåkelignende sky, som også gjorde det vanskelig å ta bilder.



Figur 27 Dråper langs pleksiglass. Bilde tatt 1900 timer.

Figur 27 viser at pleksiglasset er dekket av vandrdåper selv 800 timer(ca 30 døgn) etter at siste vannpose ble dryppet inn.

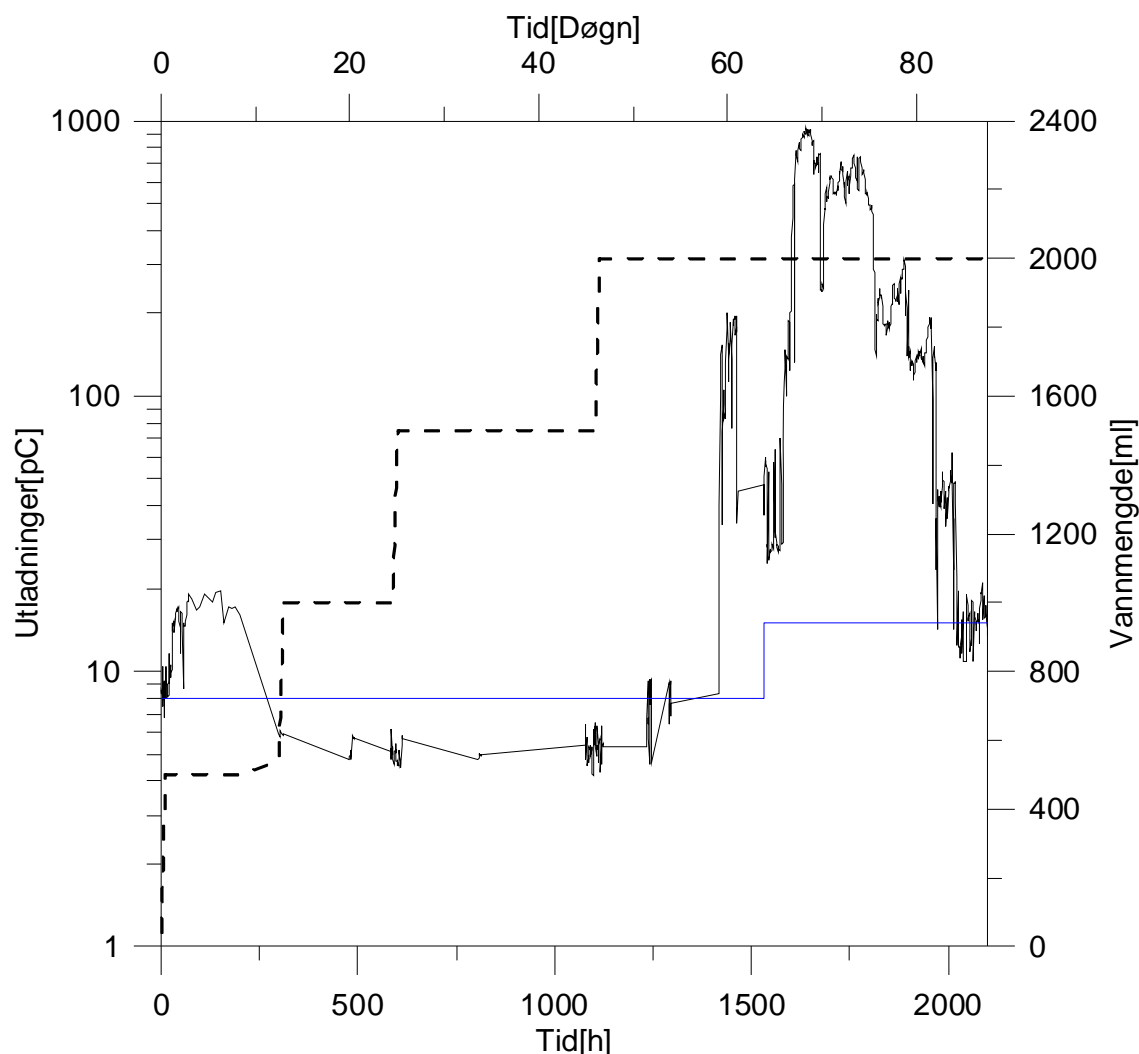


Figur 28 Dråper på konus, bilde tatt etter omtrent 2000 timer(83 døgn) med spenning.

Som illustrert i Figur 28 festet det seg dråper på konus. Dråpene som festet seg nederst på konus, sirkel merket 3 var generelt små. Midt på konus ved sirkel merket 2, var avstanden mellom dråpene generelt lavere. Å anslå størrelsen på dråpene og hvor tett de ligger er vanskelig da muligheten til å ta bilder er begrenset, men trenden er at største dråpene henger midt på konus. En kan også tydelig se spor av forureininger på konusoverflaten i dette området. Lenger oppe på konus ved sirkel merket 1 er dråpene også forholdsvis store(1-2 mm i diameter).

4.1.2 Partielle utladninger(PD)

Måling av partielle utladninger ble gjort under forsøket. Som forklart i kapittel 3 ble det i starten av forsøket ikke logget kontinuerlig på grunn av støyproblematikk. Den stiplede linjen indikerer vannmengden i termineringen(se høyre y-akse). Som tidligere beskrevet er dette gjennomsnittlig utladningsnivå logget over en time.

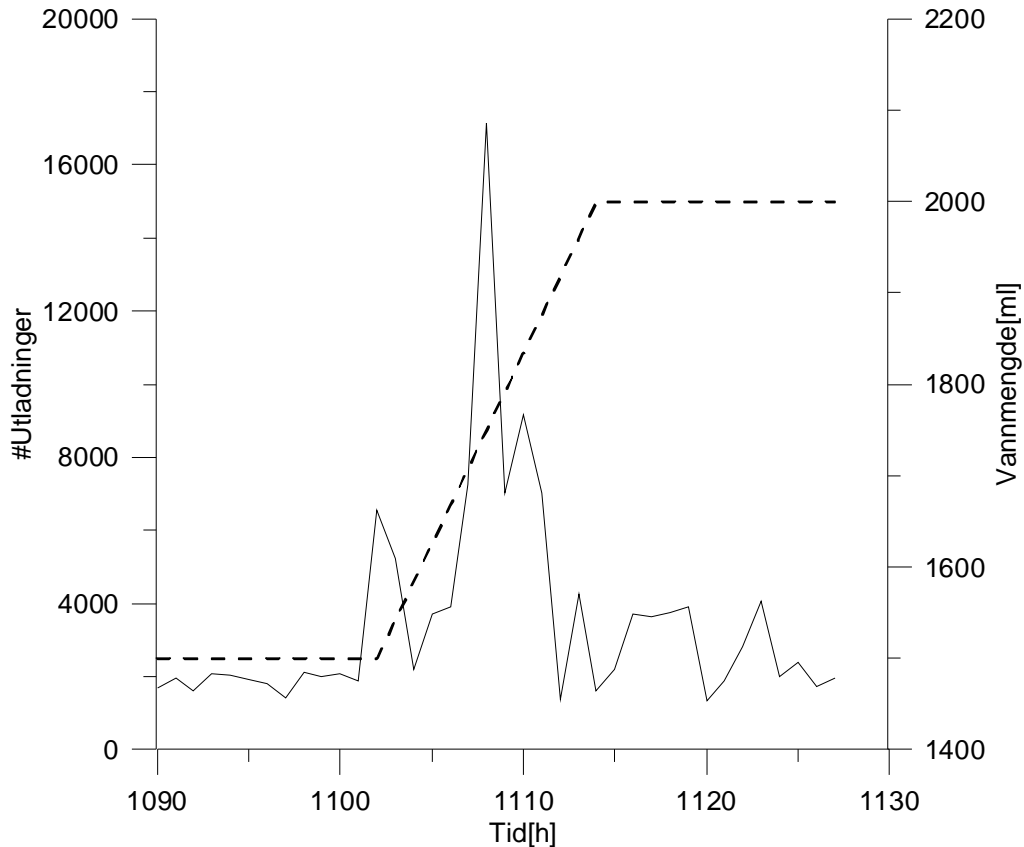


Figur 29 Gjennomsnittlig registrerte utladninger, den stipla linjen indikerer vann nivået og blå linje viser støygrensen som er på henholdsvis 8 pC og 15 pC avhengig av strømforsyning. Plottet er med 1 times oppløsning.

De registrerte utladningene er forholdsvis lave (<20 pC) de første 1400 timene. Merk den markante økningen i utladningene rundt 10 døgn etter 4. tapperperiode. De største loggede utladningene fant sted etter omtrent 1700 timer med amplitude opp mot 1 nC. Etter rundt 2000 timer var de registrerte utladningene i støyområdet (10-15 pC).

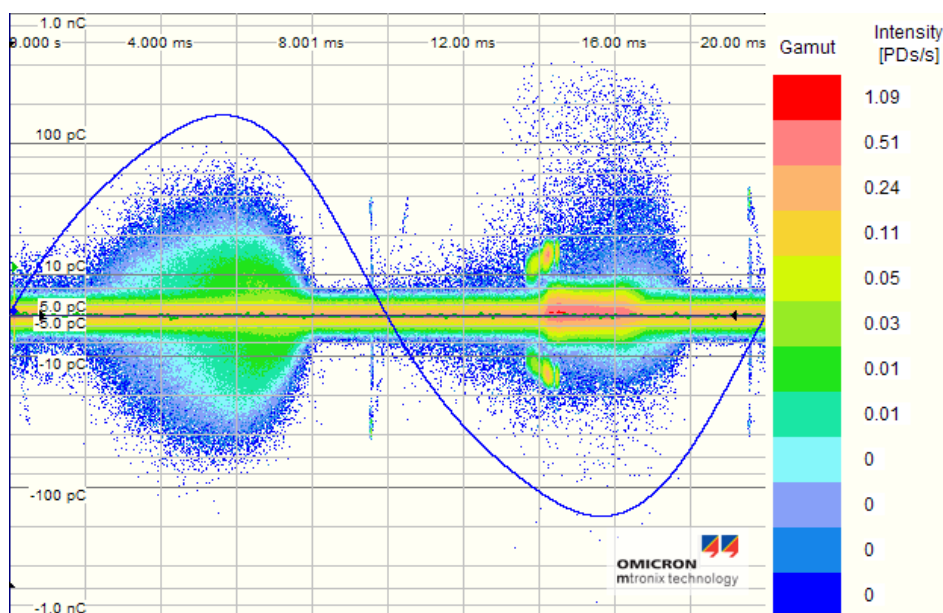
Utladnings målinger foretatt under inndrypping av vann

Som illustrert i Figur 29 var det generelt et lavt utladningsnivå de første 1400 timene. Dette syntes heller ikke å påvirkes nevneverdig av vanninndrypningen. For å studere vanndråpenes innvirkning på utladningene logges antall utladninger over 10 pC i 4. tappeperiode:

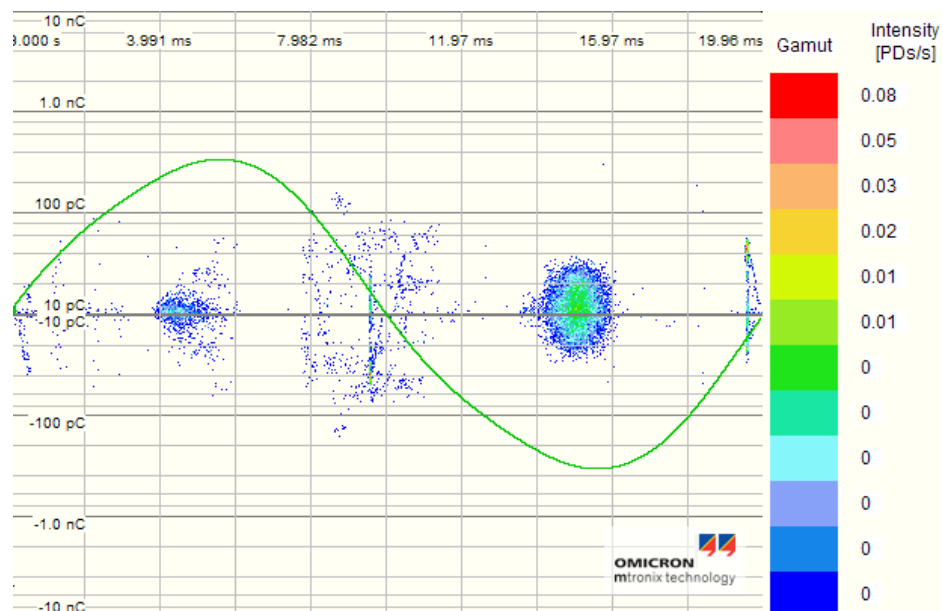


Figur 30 Antall utladninger over 10 pC i 4. tappeperiode. Den stipla linjen viser vannmengden i termineringen. Antall timer på x-aksen er referert til oppstarten av forsøket. Plottet er laget med en oppløsning på 1 time.

Kurven viser tydelig sammenheng mellom inndrypping av vann og antall utladninger over 10 pC. Det største registrerte antall utladninger(over 10 pC) på en time er 17154.



Figur 31 PD-plott tatt under inndrypning av første vannpose. Plottet er logget over 1 time.

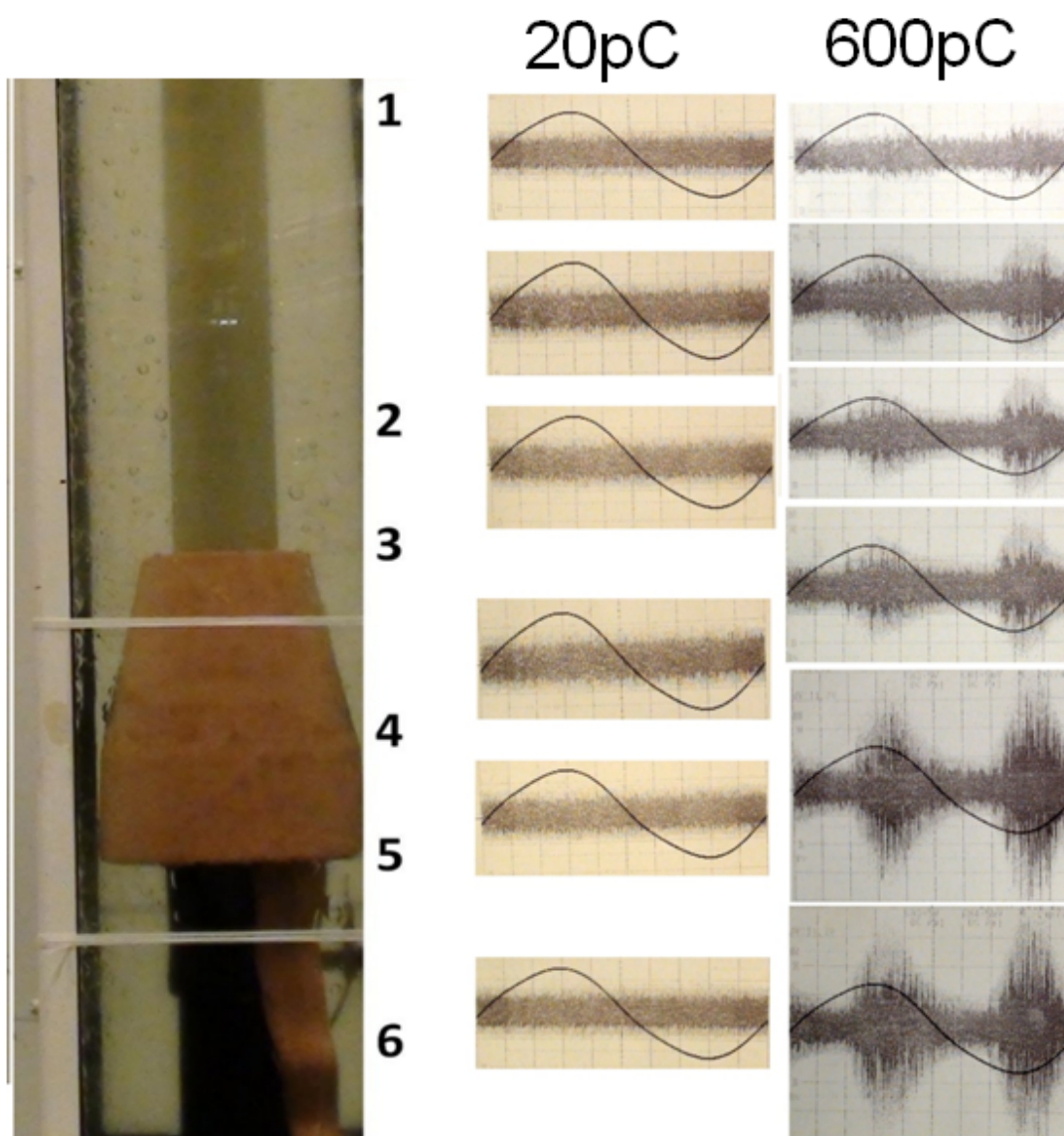


Figur 32 PD-plott tatt under inndrypning av fjerde vannpose. Plottet er logget over 1 time.

Plottene viser at utladningenes amplitude sammenfaller med sinuskurven. Utladningene registreres både i negativ og positiv halvperiode. Bortsett fra ved inndrypning av 1. vannpose som skiller seg ut ved flere utladninger var antallet lavt også under drypping.

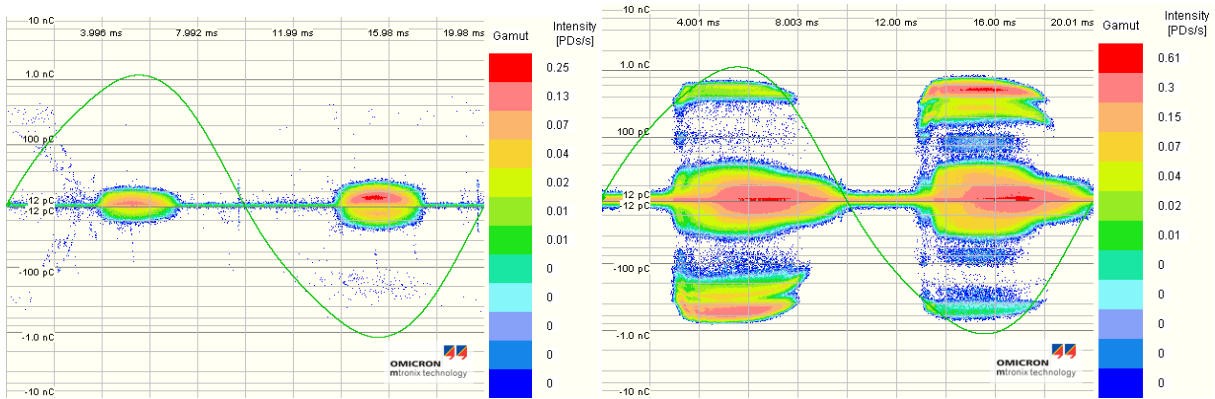
Lokalisering av utladninger:

Lokaliseringen ble gjort ved akustisk utladningsmåling. Figur 33 viser hvor på termineringen målestaven ble plassert (Merk at staven ble plassert midt på pleksiglasset og kun på en side slik at målingen ikke tar hensyn til at signalene kan være forskjellig ute ved sidene.).

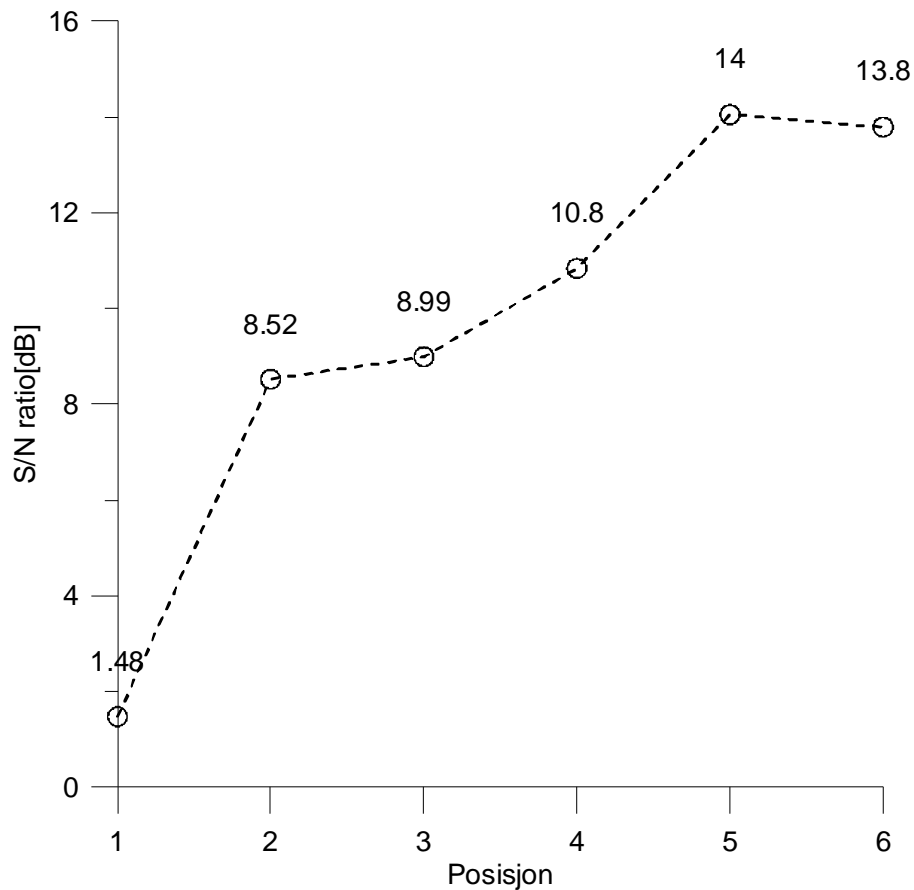


Figur 33 Resultater fra akustisk pd-måling. Nummereringen indikerer hvor på termineringen målestaven var plassert (staven ble ført vinkelrett inn direkte midt på pleksiglasset). De to bildeseriene er logget ved henholdsvis 20 pC (t. v) og 600 pC (t. h).

Det er verdt å merke seg at 20 pC målingen er gjort etter 600 pC målingen. Figur 35 viser logaritmisk fremstilling av forholdet mellom støy og målesignal for 600 pC målingen.



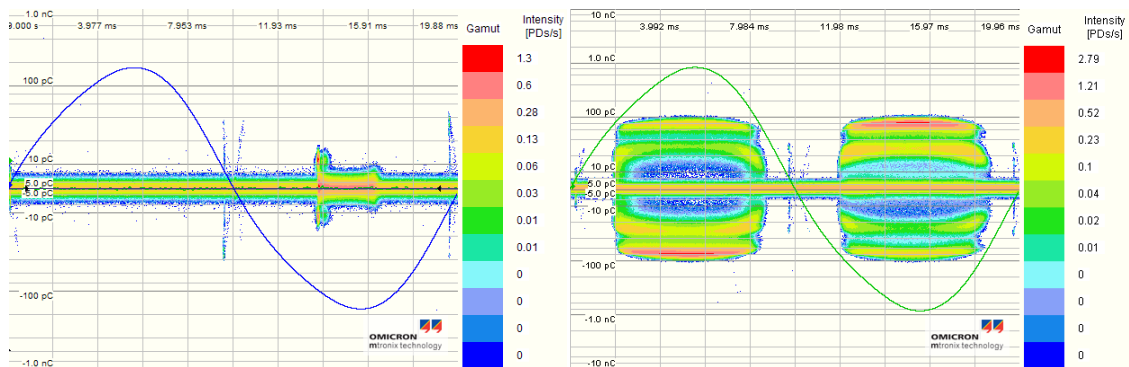
Figur 34 Utladningsmålinger logget under akustisk måling. Utladningene er henholdsvis 20 pC(t. v) og 600 pC(t. h). Loggetiden er 1 time.



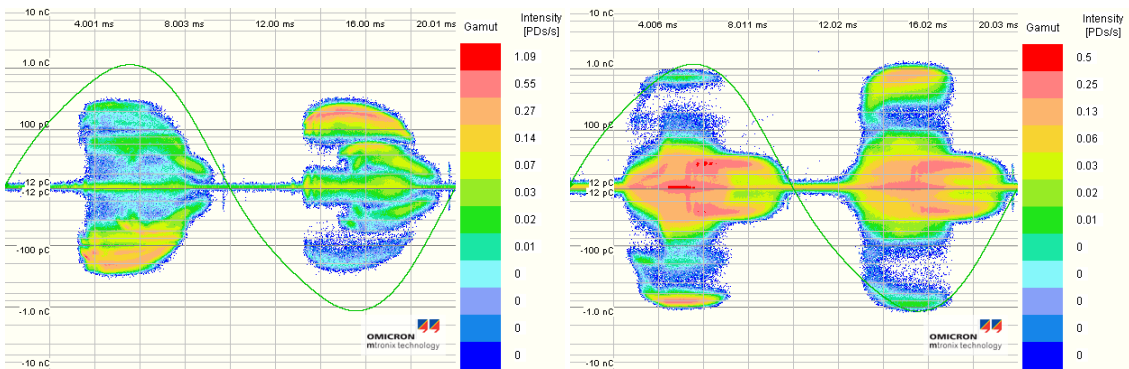
Figur 35 Figuren angir forsterkningen relativ til støybåndet. Se Figur 29 for posisjonen gitt på x-aksen.

Som vist i Figur 35 er tendensen at utladningene er størst på nedre del/ nedsiden av konus. De to målingene presentert i Figur 33 ble logget etter 1746 og 2020 timer. Det ble også forsøkt en akustisk måling ved utladningsnivå på rundt 180 pC uten at det ble detektert noen signaler.

Utladningssignaturer:



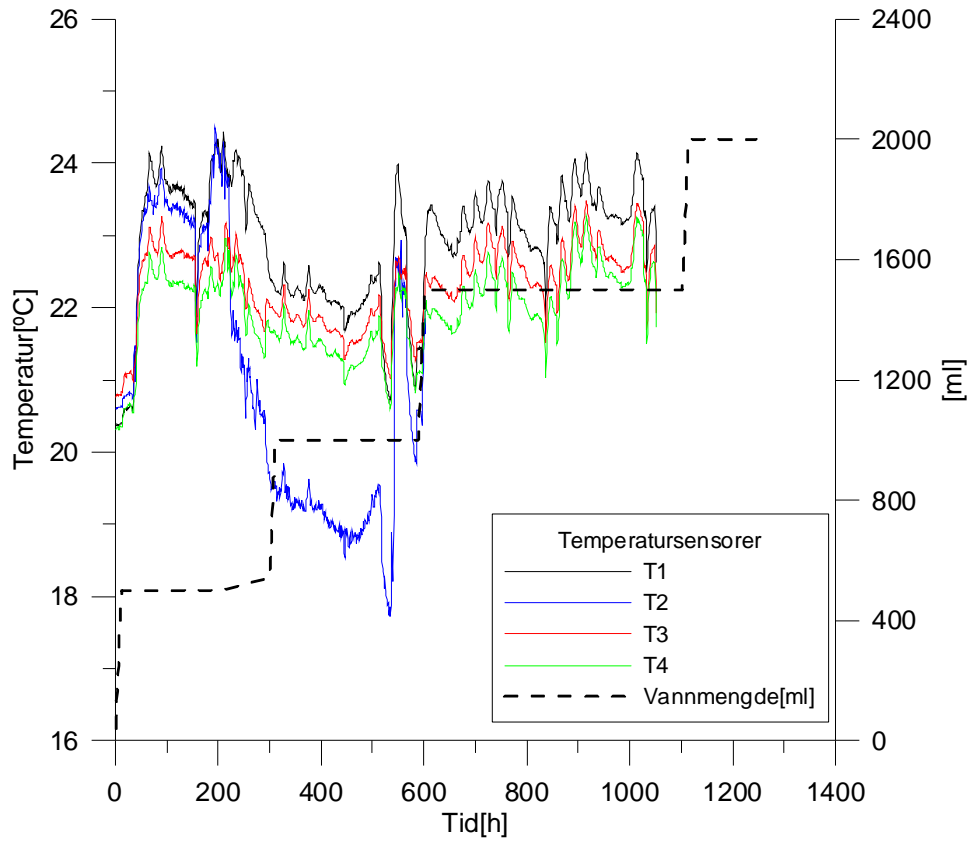
Figur 36 PD til venstre tatt etter 100 timer(0,5 l vann i termineringen). Plottet til høyre tatt etter 1443 timer(2l vann i termineringen). Loggetid 1 time.



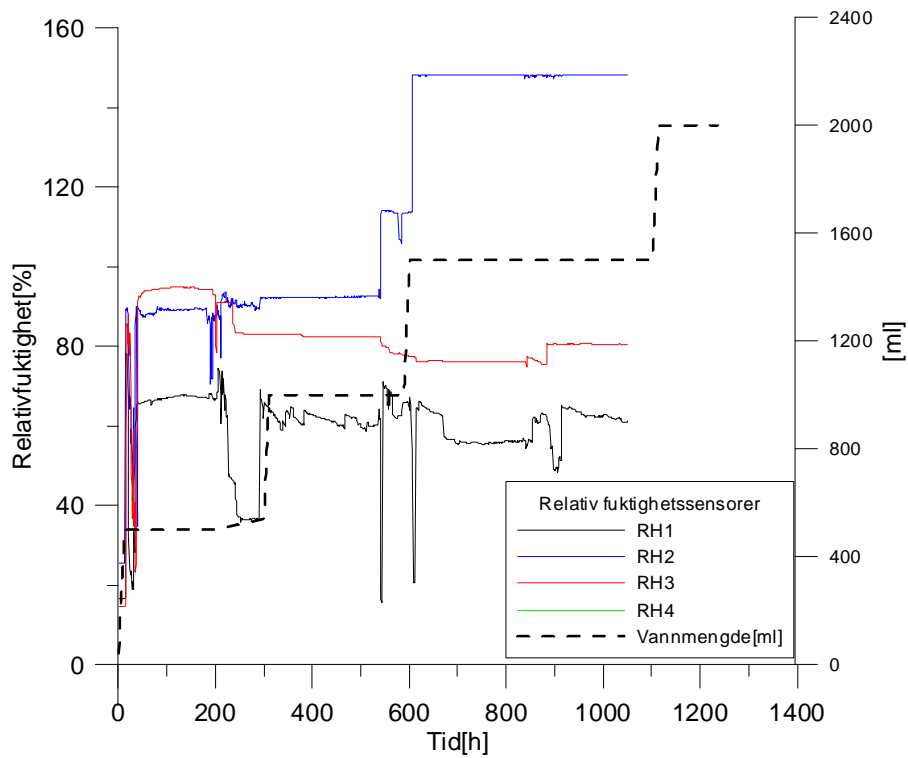
Figur 37 PD plott etter omtrent 1700 timer. Loggetid 1 time.

Under den første inndryppingen oppsto utladninger i negativ halvperiode (til venstre i Figur 36), utladningene varierte mellom 10-20 pC. Disse utladningene forsvant etter omtrent 200 timer. Etter rundt 1400 timer oppsto det på nytt utladninger ved en langt større amplitude, opp mot 1000 pC. Karakteristisk for utladningene er at formen er så å si identisk i begge halvperioder. Oversikt over utladningssignaturene logget under fullskalaforsøket finnes i Vedlegg 2.

4.1.3 Relativ fuktighet og temperaturmåling



Figur 38 Temperaturmålinger foretatt under forsøket. Det er verdt å merke seg at temperatursensor T2 sluttet å fungere etter 605 timer.



Figur 39 Relativ fuktighetsmåling foretatt under forsøket. Merk at sensor RH2 og RH4 viser urimelige verdier.

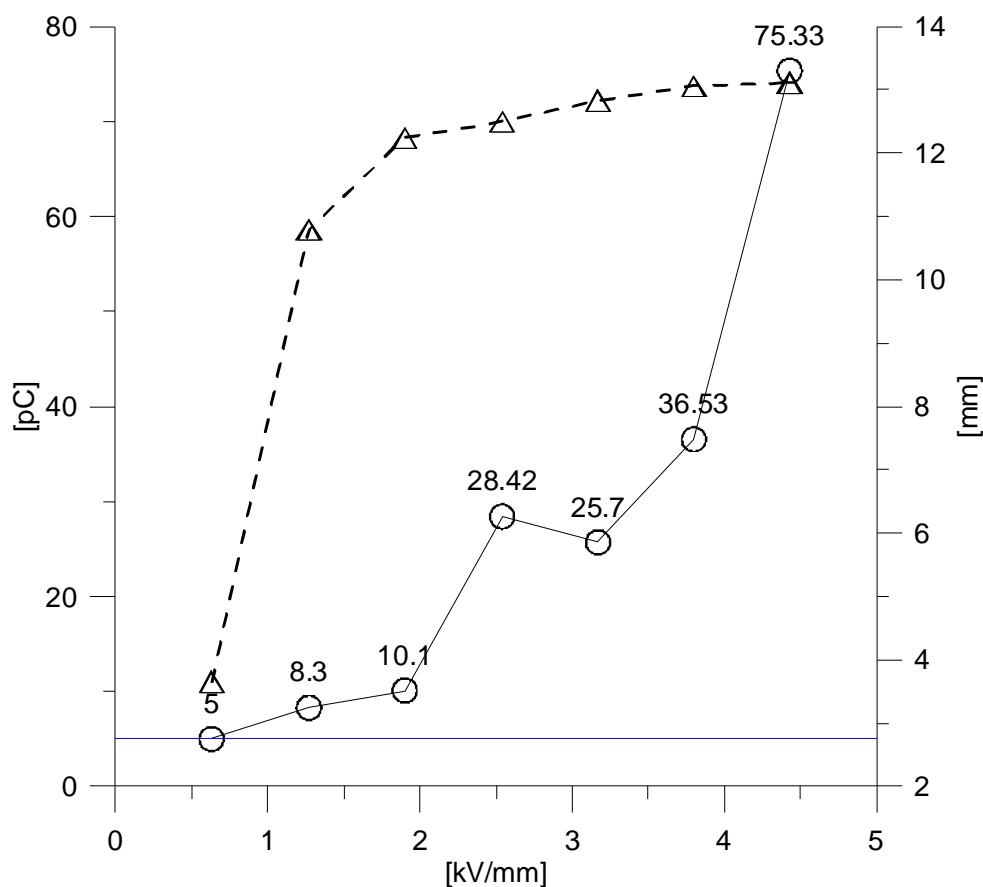
4.2 Modellforsøk

4.2.1 Studie av forløp

Målingene er utført ved å logge 3 timer på hvert spenningsnivå. Spenningen er justert opp gradvis fra 3-21 kV tilsvarende driftsfeltstyrker fra 0,63 kV/mm-4,43 kV/mm i steg på 3kV.

Tabell 3 Resultater modellforsøk

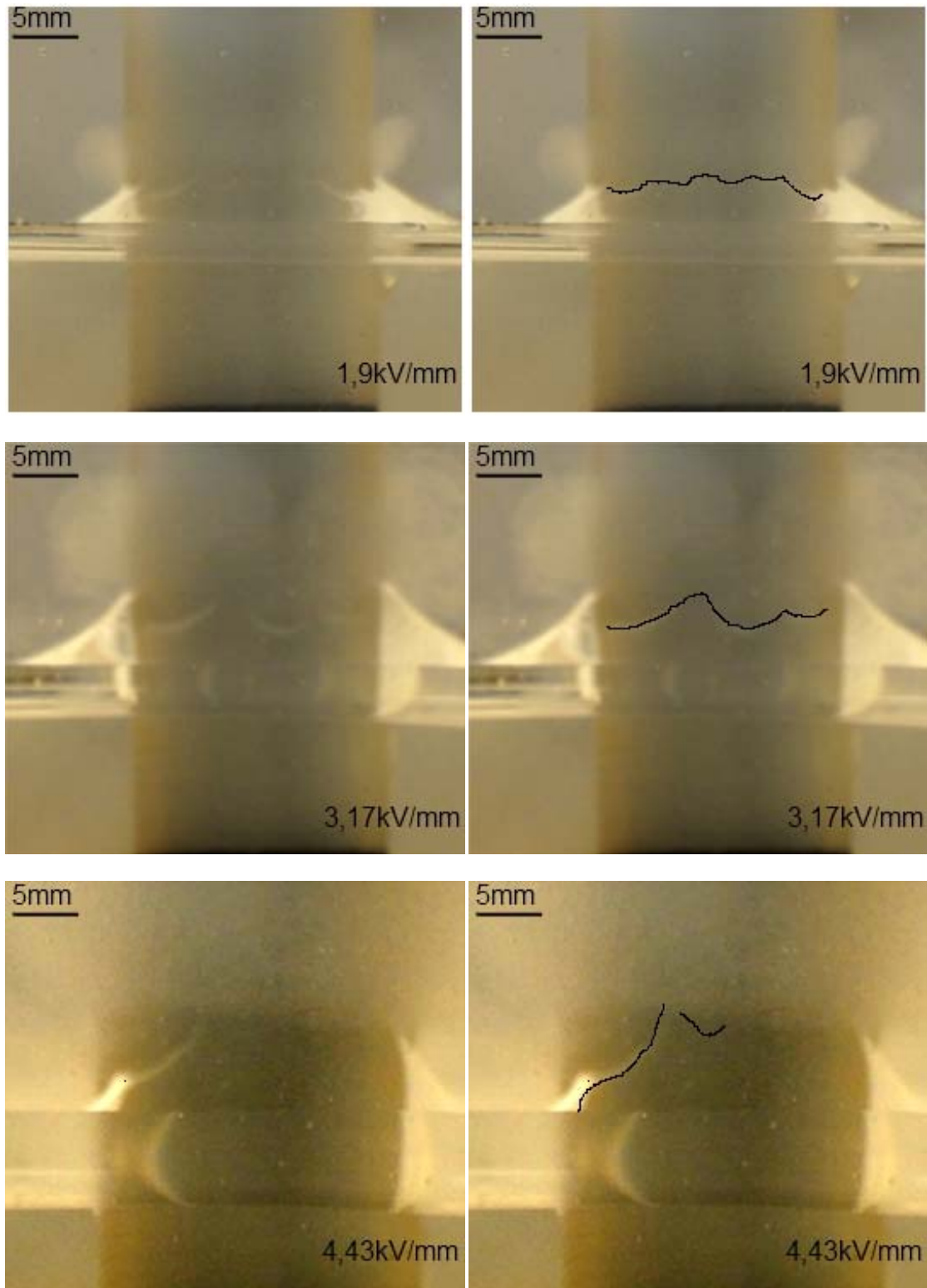
Feltstyrke E[kV/mm]	0,63	1,27	1,9	2,54	3,17	3,8	4,43
Vannfilm høyde[mm]	3,65	10,79	12,24	12,5	12,83	13,06	13,11
Utladninger[pC]	5	8,3	10,1	28,4	25,7	36,5	75,3



Figur 40 Utladninger modellkabel(heltrukket linje). Den stipla linjen viser vannfilmens posisjon relativ til nederste posisjon i spenningsløs tilstand. Blå linje indikerer støygrensen som er 5 pC.

Eksempler på bilder av optrukket vannfilm:

For å få en tydelig fremstilling av fenomenet tegnes det inn en strek langs vannfilmkanten. Kun et utvalg av bildene presenteres.



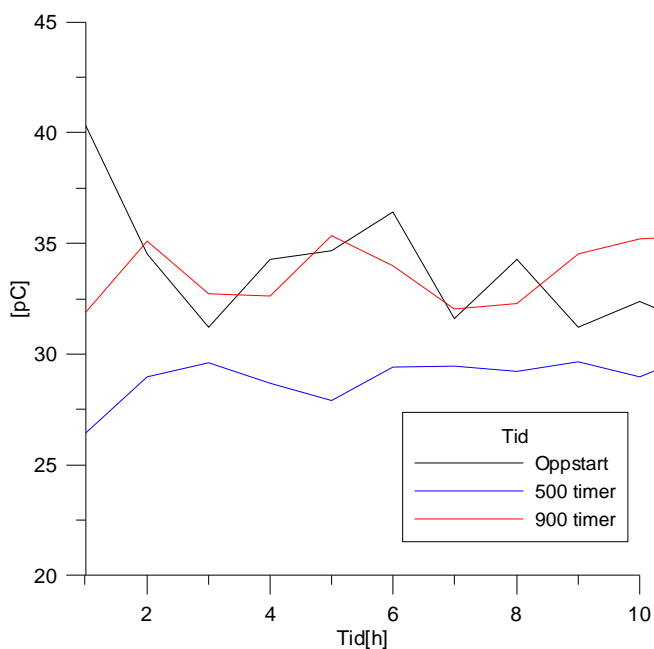
Figur 41 Øyeblikksbilder av vannfilm ved ulike feltstyrker

Når driftsfeltstyrken når 1,27 kV/mm begynner små dråper å slites løs fra vannfilmen. Disse dråpene brer seg utover i oljen som en tåkelignende sky. Etter hvert som feltstyrken økes, trekkes også dråper oppover langs kabelisolasjonen. Det er verdt å merke seg at vannfilmen kanten ikke trekkes jevnt oppover, men at dette skjer i form av at enkelte områder danner "tagger" som strekker seg oppover. Tendens synes å øke med feltstyrken.

4.2.2 Langtidsforsøk

Som beskrevet i kapittel 3 ble det i aldringsforsøket startet opp fem parallelle kabler. Status for forsøket ble som følger:

- Kabel 1 ble spenningstestet i 2409 timer uten å havarere.
- Kabel 2 havarerte etter 1385 timer.
- Kabel 3 og 4 ble spenningstestet i 2211 timer uten å havarere.
- Kabel 5 ble testet i 900 timer uten havari.



Figur 42 PD-måling på modellkabel 5.

Modellkabel 5 ble testet i 900 timer. Som vist i Figur 42 var det liten endring i utladningene.

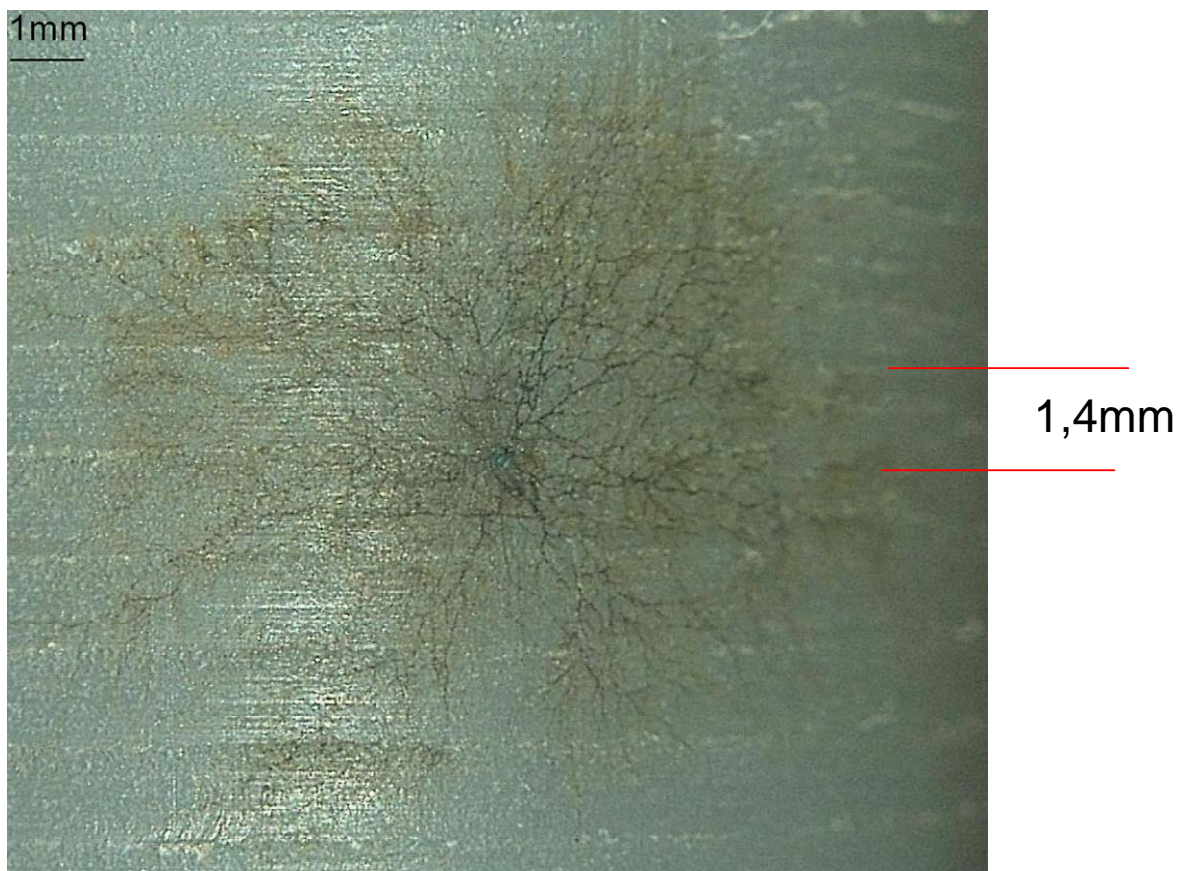


Figur 43 kabel 1, 3 og 4 (fra venstre). Den røde linjen indikerer vannfilmens posisjon uten påtrykt spenning.

Inspeksjon av kabel 1,3 og 4 viste ingen tegn synlige skader på isolasjonen. Modellkabel 5 er ikke undersøkt ettersom forsøket videreføres.

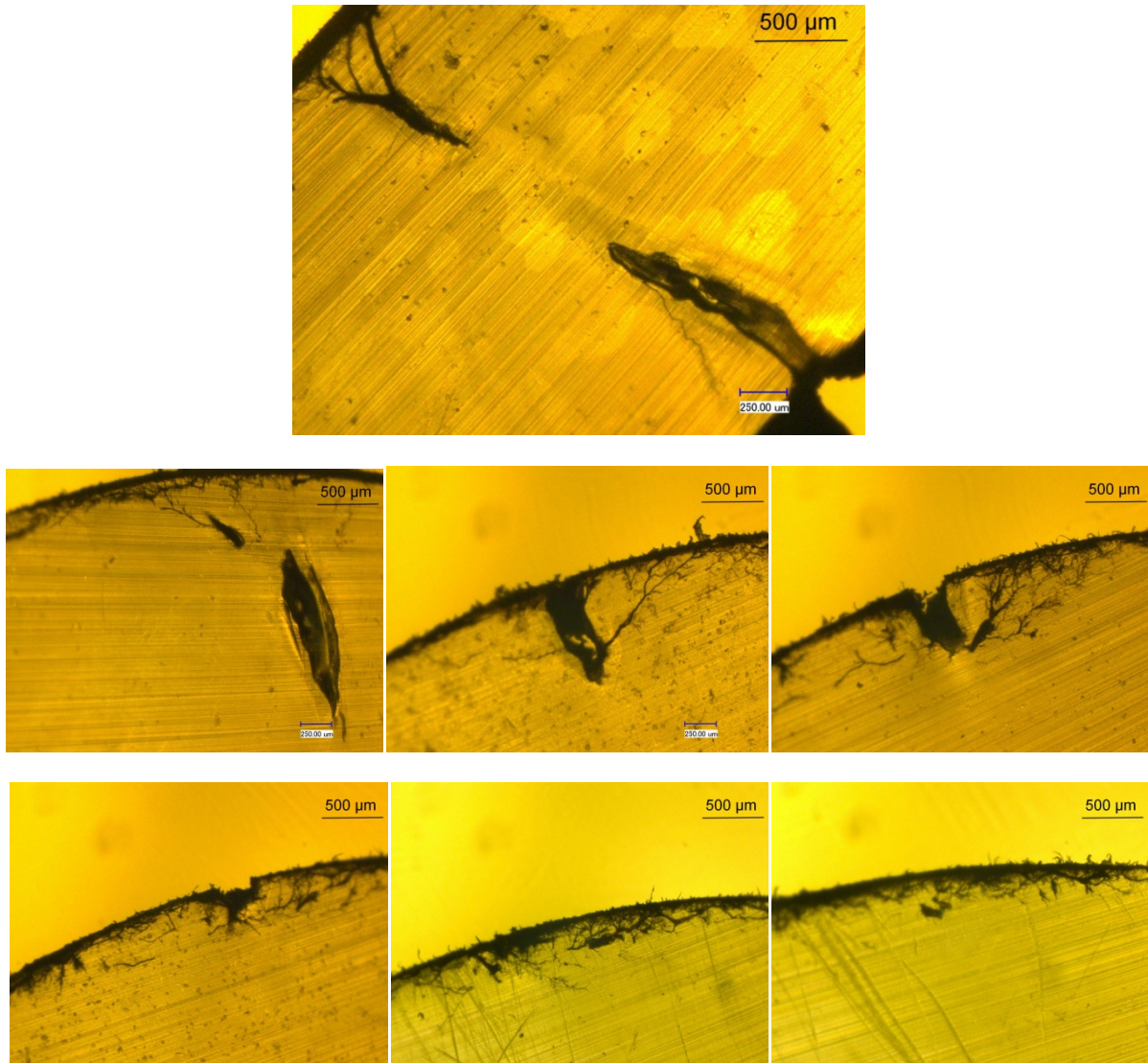
Undersøkelse av havarert kabel:

Det var ingen spor etter misfarging av isolasjonen i området rundt treet. Selve gjennomslag lå omtrent 18 mm referert til spenningsløs tilstand. Størrelsen på treet ble målt til å være 13,8 mm x 10,9 mm. Figur 44 viser trackingen på overflaten av kabelen.



Figur 44 Tracking på modellkabel 2. Området mellom de røde linjene er snittet og vist i Figur 45.

Kabelen ble snittet i 0,2 mm tykke skiver, Området som ble snittet er markert med røde linjer i Figur 44. Skivene undersøkes under digitalt mikroskop. Alle bildene er forstørret omtrent 100 ganger. Bildeserien i Figur 45 er lagt opp slik at bilde lengst oppe til høyre i figuren viser selve gjennomslagskanalen. Merk at indrehalvleder er ødelagt her.



Figur 45

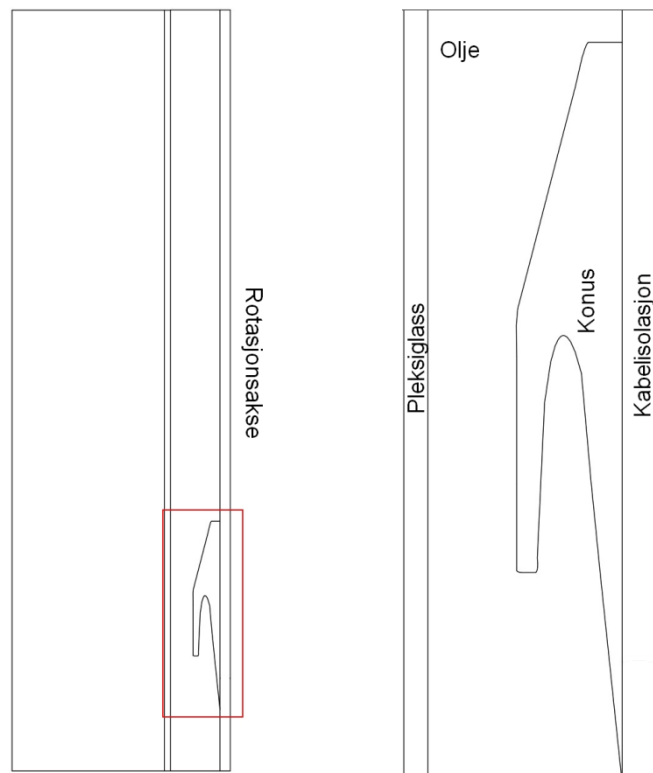
Ser av Figur 45 at det elektriske treet er tydelig grenformet.

5 Feltsimuleringer

I dette kapittelet presenteres feltsimuleringene gjort i dette prosjektet. Det tas utgangspunkt i en feilfri fullskala terminering, hensikten er å illustrere feltforholdene rundt vanndråper som kommer inn i termineringen og på bakgrunn av dette kunne si noe om kreftene som virker. Casene som studeres baseres på observasjoner både under drypping og stasjonære forhold etter at dryppingen er avsluttet. Feltberegningene er utført i Comsol Multiphysics ved å bruke Finite Element Methode(FEM). Modellen baseres termineringen brukt i prosjektet. Dimensjoner på konus finnes i vedlegg 4.

5.1 Modeller og forenklinger

Modellen som er brukt i dette prosjektet er basert på fysiske mål fra fullskala termineringen brukt under forsøkene. Den valgte løsningen i dette prosjektet er å bruke en rotasjonssymmetrisk modell.



Figur 46 Simuleringsmodell

Konus kan uten stor feil antas rotasjonssymmetrisk. Pleksiglasshuset er firkantet, men feltstyrken så langt unna konus vil uansett ikke være avgjørende for feltforholdene som studeres i simuleringene. Vanndråpen vil derimot bli modellert som et rør som ligger rundt

kabelen (rotasjonssymmetrisk). Dette vil være en forenkling i forhold til den dråpeformede geometrien. Ettersom hensikten med simuleringen ikke er å gjøre nøyaktig beregninger av feltstyrken, men kun å illustrere hvordan felte endres ved tilstedeværelse av vann, antas det at forenklingen er god nok.

Tabell 4 Materialkonstanter brukt i modelleringen

Material	Relativ permittivitet
PEX	2,3
Silikon olje	2,63
Pleksiglass	3
Konus	3,5
Vann	80

Feltstyrkene relateres til 1 kV påtrykt spenning.

Følgende case studeres:

Referansetilstand

Feltforholdene i termineringen før noe vann dryppes inn.

Vann på pleksiglass

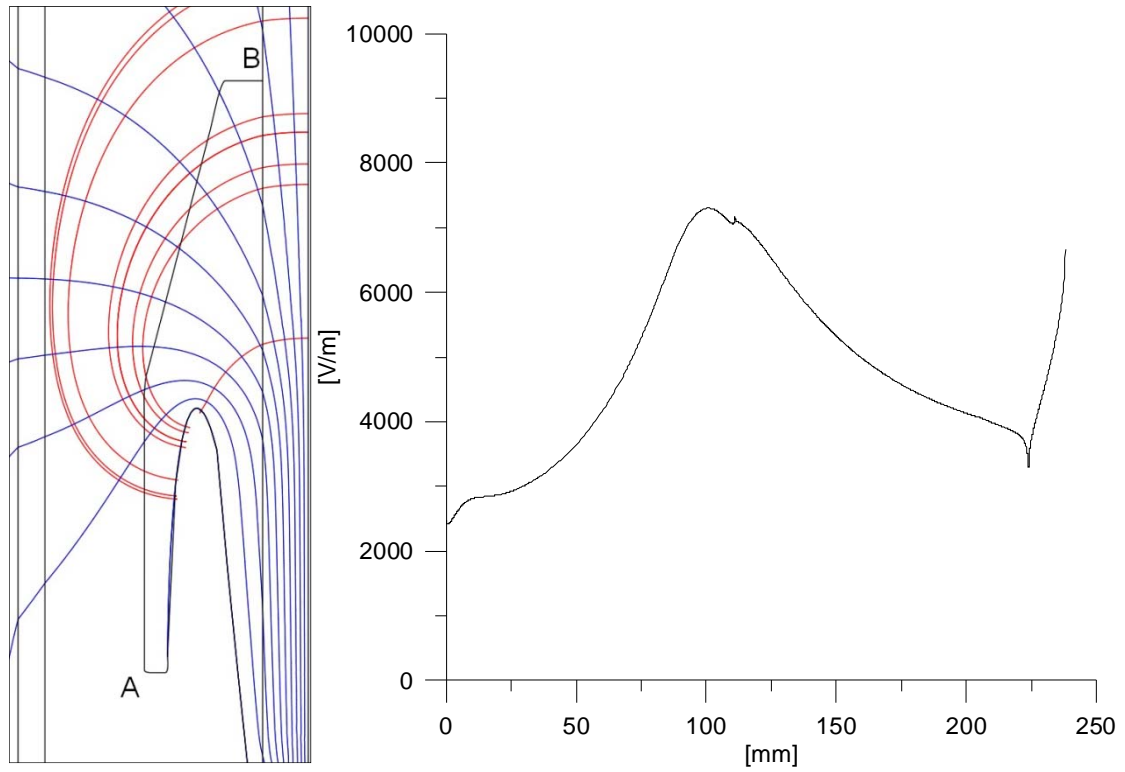
Som illustrert i kapittel 4.1 samlet det seg ganske tett med dråper oppover langs pleksiglasset. Det forenkles ved å belegge hele pleksiglasset med 1 mm tykk vannfilm.

Vanndråper rundt konus

Som beskrevet i kapittel 4.1.1 ble dråpene trukket inn mot konus i det de beveget seg nedover i termineringen og etter hvert festet dråpen seg på konusoverflaten. Det ses derfor på hvordan feltforholdene endres med vanndråper plassert rundt konus.

5.2 Resultater

Referansetilstand

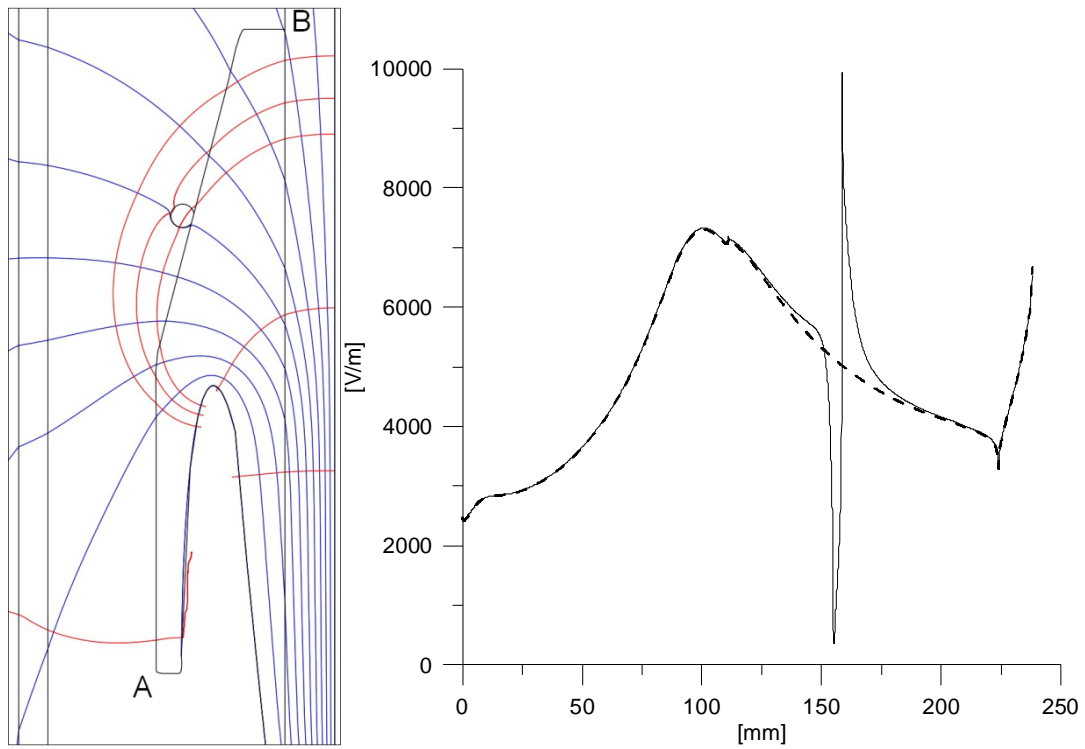


Figur 47 Feltlinjer og feltstyrke uten vann i termineringen. Plottet er av feltstyrken langs ytterkanten av konusen fra pkt. A til pkt. B.

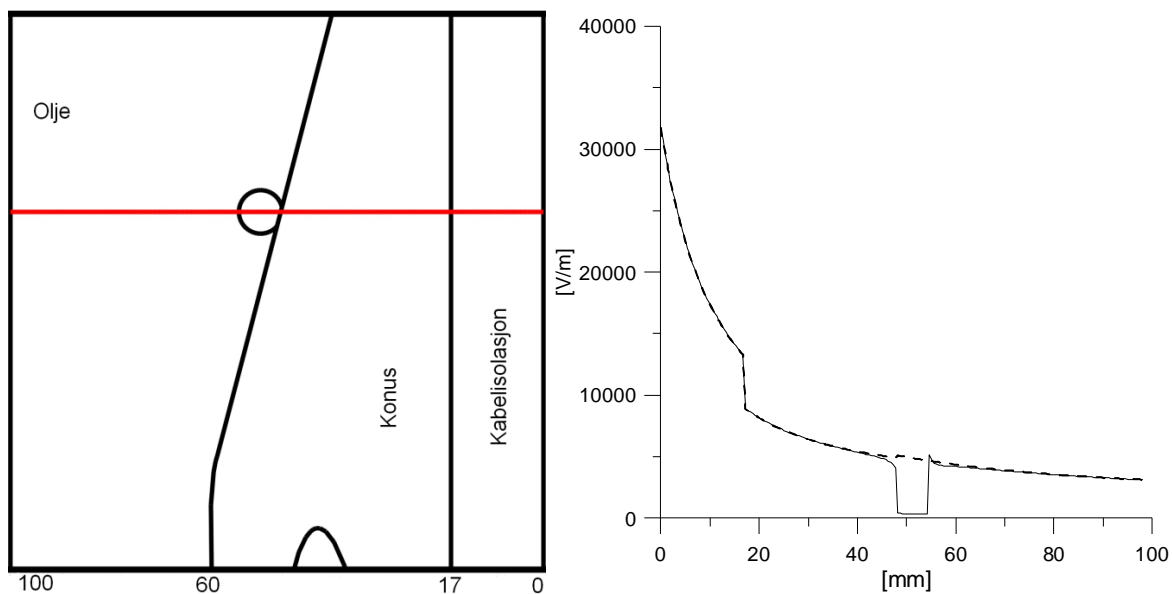
Figur 47 viser at det elektriske feltet langs konus er sterkest ved feltfordeleren og på toppen av konusen.

Vanndråper rundt konus

Det første tilfelle som studeres er en enkelt vanndråpe på konus overflaten.

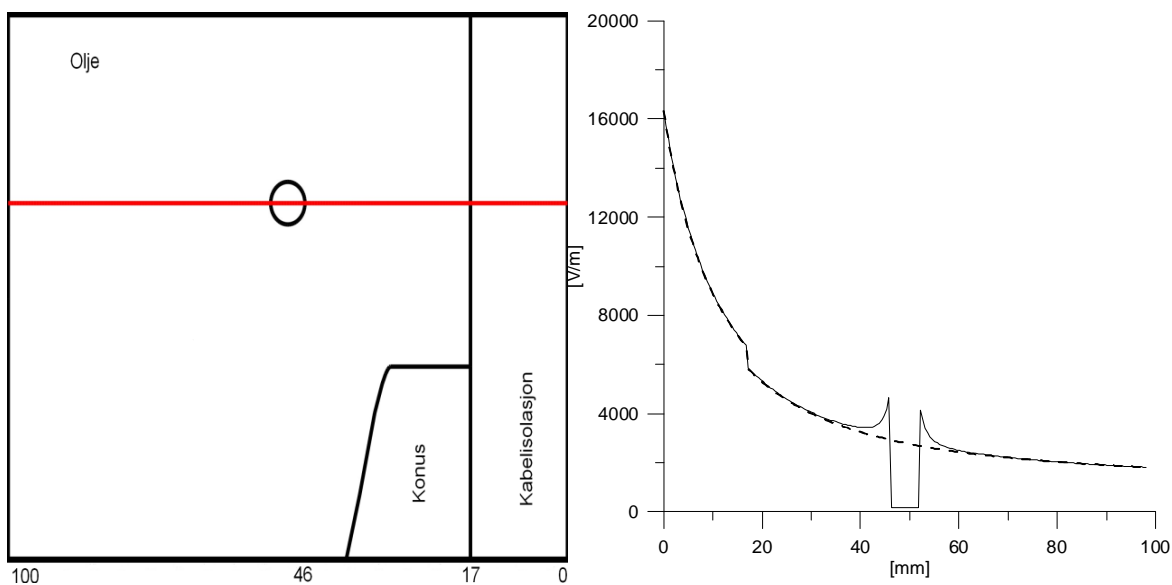


Figur 48 Feltstyrken langs ytterkanten av konusen fra pkt. A til pkt. B. Den stipla linjen i plottet er feltstyrken uten vanndråpe.



Figur 49 Feltstyrke plottet fra leder og ut til pleksiglass, indikert med rød linje. Den stiplede linjen i plottet(t. h) indikerer feltstyrken uten dråpen.

En dråpe plasseres nå over konus:



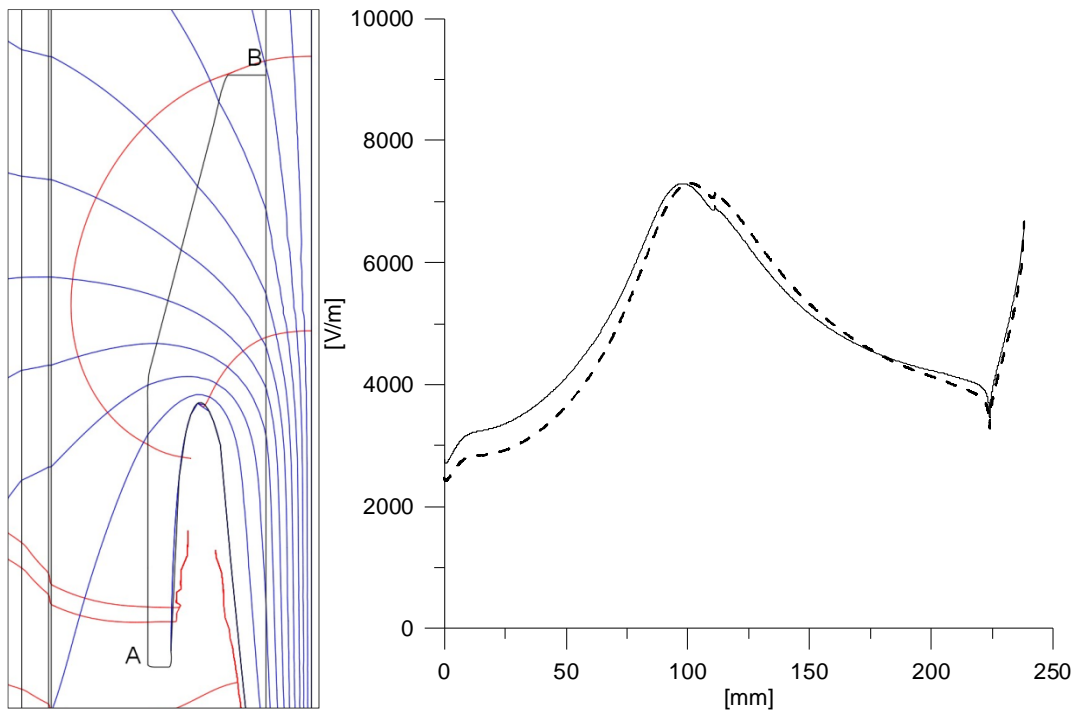
Figur 50 Feltstyrke plottet fra leder og ut til pleksiglass, indikert med rød linje. Den stiplede linjen i plottet(t. h) indikerer feltstyrken uten dråpen.

Som vist på Figur 48 oppstår det en lokal feltforsterkning ved i grenseflaten mellom vann, olje og konus. Bortsett fra dette påvirker ikke dråpen feltforholdene langs konus i nevneverdig grad. Det registreres at feltet er litt sterkere i overgangen dråpe vann i forhold til dråpe konus.

Det registreres en lokal feltforsterkning i overgangen mellom dråpen og oljen. Feltet avtar jevnt ut fra kabelen.

Vanndråper på pleksiglass

Dråper modellert som sammenhengende vannfilm



Figur 51 Feltlinjer og feltstyrke med vannfilm på pleksiglasset. Plottet er av feltstyrken langs ytterkanten av konusen fra pkt. A til pkt. B. Den stipla linjen i plottet er feltstyrken uten vannfilm.

Vannfilmen langs pleksiglasset endrer ikke det elektriske feltet ved konus i særlig grad.

6 Diskusjon

Måleoppsett/prosedyre

Hensikten med fullskalaforsøket var å observere hvordan dråpene beveger seg og etter hvert akkumuleres inne i termineringen under vannlekkasje. Under en virkelig lekkasje vil tidsforløpet og vannmengde være av stor betydning. Dette fordi utladningsaktivitet ikke nødvendigvis oppstår momentant, men kan utvikle seg over tid avhengig. Ettersom forsøket ble utført over en forholdsvis kort tidsperiode(ca 3 måneder) det ble derfor valgt å dryppe inn 0,5 liter i løpet av 12 timer med et opphold på 7-14 døgn mellom hver periode. Dette vil sannsynligvis være en for stor akselerering i forhold til hva som er realistisk i felt, men gitt den korte tidsperioden ble dette sett på som en rimelig tilnærming.

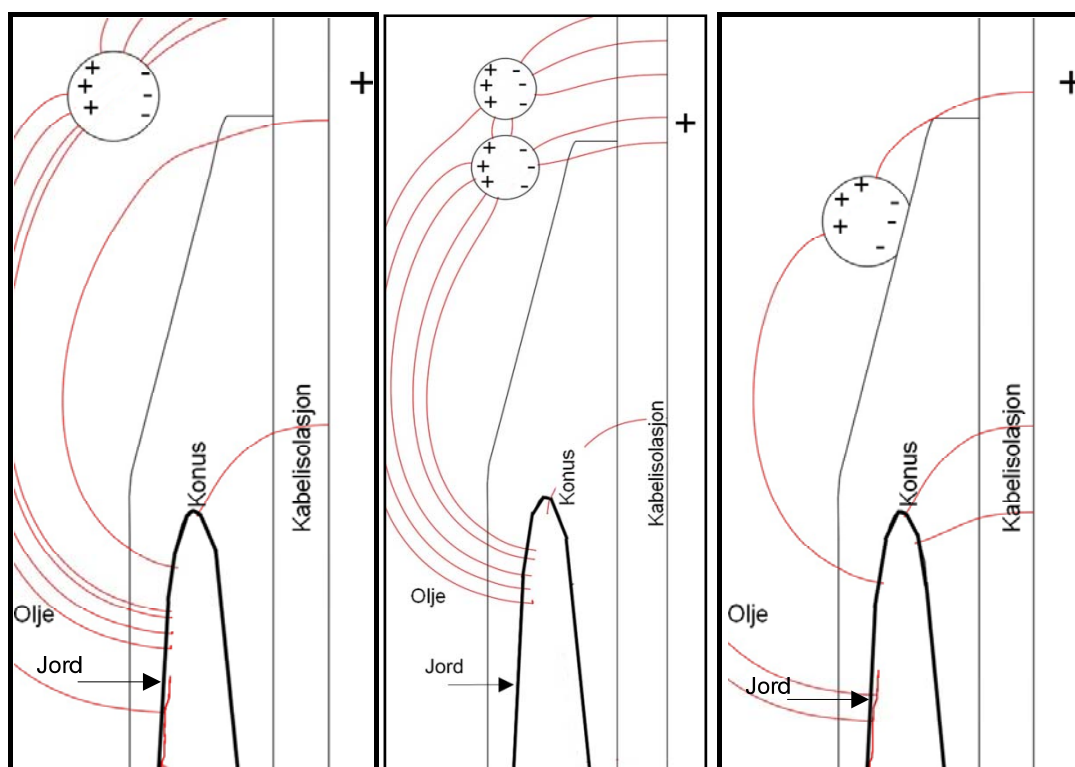
Hovedfokus i modellforsøkene var å studere området der havariene finner sted. Ettersom forsøkene ble utført i småskala ble spenningen skalert for å få samme feltstyrke som på fullskala kabler ved 132 kV påtrykt linjespenning.

Observasjoner

Under selve inndryppingsperioden trekkes i første rekke tre observasjoner frem som gjennomgående:

- Dråper trekkes inn mot konus etter hvert som de beveger seg nedover i oljen.
- Når to eller flere dråper kommer nært nok hverandre støtes dråpene fra hverandre eller trekkes sammen. Ved frastøtning flytter dråpene seg typisk avstander i området 3-5 cm i enkelt tilfeller lenger. Noe som tyder på at det virker en stor kraft mellom dråpene.
- Dråpene fester seg i stor grad på pleksiglass og konus. På konus er det særlig området ved feltdeler(omtrent midt på konus) som dekkes. Dersom spenningen slås av i en periode(noen timer) henger dråpen fortsatt fast på konusoverflaten.

Observasjonene er presentert ved bildeserier i kapittel 4.1.1.



Figur 52 Grafisk fremstilling av de tre observasjonene gjort under forsøket. a) Dråpe trekkes mot konus b) Dråper støtes fra hverandre c) Dråper fester seg på konus overflaten. Det antas nøytrale vanndråper. Størrelsen på dråpene er skalert opp for illustrasjon.

Den første observasjonen kan forklares ut i fra den dielektrforetiske kraften som virker på vanndråpene. Kraften kan forklares ut fra "point-dipole approximation"(PDA) presentert i kapittel 2 der det antas at vanndråpene er dipolare og nøytrale. Det elektriske feltet er inhomogent og vil derfor være ulikt på hver side av dråpen. Etersom kraften er gitt av $F=qE$ vil det i virke en nettokraft på dråpen som trekker i den retningen der feltet er størst. Feltsimuleringer viser at feltet avtar jevnt med avstanden fra kabelen, dråpene vil derfor trekkes inn mot konus. For et AC-felt som tilfelle her vil polariseringen endres med feltet slik at effekten blir den samme uavhengig av feltretningen. Dette illustrert i Figur 52 a.

Den andre observasjonen knyttes til den kraftige akselerasjonen som oppstår når to dråper kommer nært hverandre. Ut fra PDA modellen kan dette forklares med at det er to krefter som virker mellom de frie dråpene de er en radiell og tversgående. Retningen på den resulterende kraften vil være avhengig av vinkelen mellom dråpene. Når vinkelen mellom dråpene er 90° (dråpene plassert rett over hverandre, se Figur 52 b) vil kraften kun ha en radiell komponent som trekker dråpene fra hverandre. I motsatt tilfelle dersom vinkelen er 0° vil dråpene være på siden av hverandre og kun ha en radiell komponent og trekkes sammen.

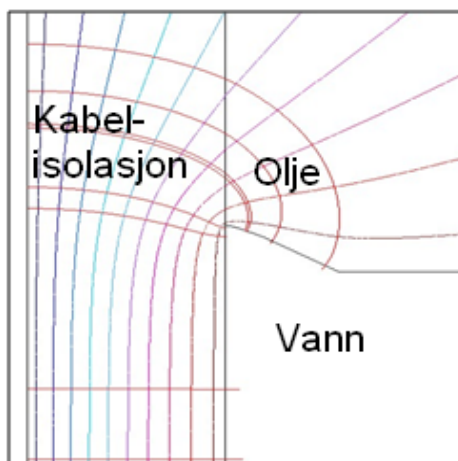
Den tredje observasjonen er at dråpene fester seg på konusoverflaten og på pleksiglasset. Feltsimuleringer viser at det lokale feltet i kanten av dråper på konus blir høyt, nøyaktig hvor høyt er det vanskelig å fastslå ettersom feltsimuleringsmodellen er forenklet. Dråpene

endrer også sannsynligvis form på grunn av feltpåkjeningen. Dette er det ikke mulig å undersøke visuelt da det er meget begrenset sikt inn mot konus. Når spenningen slås av er det i hovedsak to krefter som virker på dråpene, den ene er tyngdekraften og den andre er overflatespenninger. Hvorvidt dråpene vil løsne og gli nedover vil da avhenge av størrelsen og materialeegenskapene til konusoverflaten.

Partielle utladninger

Måling av partielle utladninger viste et lavt utladningsnivå (gjennomsnitt over 1 timer < 20 pC) de første 1400 timene til tross for at det ble dryppet inn 2 liter vann. Feltsimuleringer viser at områdene med høyest elektrisk felt er ved feltfordeler og topp av konus. Selv her ble de observert frie vanndråper på overflaten uten at de ble registrert utladninger over 20 pC. Under selve inndrypning av vannet ble det detektert en økning i antall utladninger. Effekten var størst ved første inndrypning med utladninger i området 100 pC. Antall utladninger var derimot få (Det ble detektert 5000-17000 utladninger over 10 pC pr. time i 4. inndrypningsperiode.) og fenomenet ble kun observert i noen timer under selve inndrypningen det er derfor lite trolig at disse utladningene vil kunne føre til nedbrytning av isolasjonen. Etter 1400 timer oppstod en periode på rundt 600 timer med større utladninger (50 pC-1 nC) før utladningen sank til rundt 10-15 pC (avhengig av støy). Det presiseres at disse utladningene oppsto rundt 10 døgn etter siste inndrypning av vann. Akustisk detektering viste sterkest signal på nedre del og under konus. Feltsimuleringen viser at feltet op nedre del av konus er lavt sammenlignet med lenger oppe. Det er derfor sannsynlig at vann kombinert med forurensinger på konusoverflaten (avbildet i kapittel 4.1.1) vil kunne flytte det elektriske potensialet nedover langs konus. Dette kan også kobles til observasjoner av havarerte termineringer der det er funnet spor etter utladningsaktivitet på konus. Figur 4 viser spor etter utladninger i nedkant av konus på en havarert terminering.

Modellforsøk gjennomført ved relevante feltstyrker viste utladninger i størrelsesorden 30-40 pC. Grunnen til de lave utladningene kan relateres til feltbilde som oppstår når vannfilmen trekkes opp langs kabelisolasjonen. Ettersom vannfilmen former seg avhengig av kreftene som virker vil denne kunne bidra gi en "bedre" feltfordeling. Fenomenet med opptrukket vannfilm er illustrert i Figur 53. Det ble gjort forsøk på å lokalisere utladningene langs overflaten ved å bruke mørkerom og ta bilder. Dette førte ikke frem, sannsynligvis grunnet at kameraet ikke var lyssterkt nok (Kameraet som ble brukt var Nikon D90).



Figur 53 Felt- og ekvipotensiallinjer i modellforsøk[17]. Vannfilmen er her antatt godt ledende og er derfor modellert som jordpotensial.

Havari

Det ble ikke observert noen form for tracking på fullskala termineringen etter 2100 timer med testing. Merk at termineringen ikke ble tømt for olje observasjonene ble gjort fra utsiden. Dette indikerer at tidsaspektet i forsøket er for kort til at et havari kan finne sted. Den stokastiske plasseringen til vanddråpen vil selvsagt også være en viktig faktor.

I modellforsøket ble fem identiske kabler aldret. Dette resulterte i et havari etter 1385 timer, forsøket varte i totalt 2400 timer De tre andre undersøkte kablene hadde ikke noen synlige spor etter utladningsaktivitet på overflaten. Ettersom antall parallelle forsøk er lavt er det ikke mulig å trekke konklusjoner på hvor lang tid det tar før et havari oppstår. Men resultatene indikerer stor statistisk spredning. Studier av den havarete kablen i mikroskop viser at trackingen på overflaten og treveksten innover i isolasjonen ser ut til å bre seg ut fra kun et bestemt punkt på overflaten. Dette tyder på at det aktuelle punktet hadde en svakhet som senket isolasjonsmaterialets lokale toleranse for feltpåkjenninger. I litteratur foreslås det flere grunner til at slike områder oppstår [14]. En mulig årsak er at det oppstår spenn i materialet under herding og dermed stor mulighet for sprekk dannelse. Andre årsaker kan være tilstedeværelse av partikler i isolasjonen, disse vil kunne føre til feltforsterkning og initiere utladninger. Skader kan også være påført under selve montasjen eksempelvis i form av kuttskader ved fjerning av ytre halvleder. Hvorvidt denne type feil var aktuelle i modellforsøket er selvsagt umulig å vite med sikkerhet. Langtids PD-måling(900 timer) utført på en modellkabel viser ingen tegn til utladningsnivået er økende.

Gjennomslaget i modellkabelen skjedde 18 mm over vannfilmen som illustrert i Figur 40 er filmen ved denne feltstyrken trukket omtrent 13 mm opp langs kabelisolasjonen. Dette samsvarer med erfaringer fra felt der gjennomslagene typisk kommer noen cm over konus. Tidligere arbeid [17] viser at vanddråper trekkes fri fra vannfilmen og oppover langs kabelisolasjonen. At dråpene som trekkes oppover kablen kan etterlate seg små dråper og

skape en ledende flate langs isolasjonen som flytter jordpotensialet oppover virker sannsynlig.

6.1 Feilkilder

Måling av partielle utladninger vil alltid være sårbare for støy. Særlig målingene gjort under inndrypning av vann der antall utladninger over 10 pC akkumuleres (svært få utladninger i noen timer bare 2000-3000). Eksempler på ting som virker inn er dersom en skrur av/ på lyset.

Statistisk usikkerhet vil ha innvirkning på aldringsforsøk ettersom det er et meget begrenset antall forsøk som er gjennomført.

Ved behandling av bilder ble avstander målt ved å bruke en kjent avstand på bilde og relatere dette til antall piksler. Metoden testes mot kjente avstander som bredden på henholdsvis kabeltermineringen og modellen dette gir nøyaktighet på rundt 0,2 mm.

7 Konklusjon

Den overordnede målsetningen med denne oppgaven har vært å undersøke hvordan vanninntrengning leder frem til havari av oljefylte kabeltermineringer. To ulike måleoppsett er benyttet i arbeidet fullskala testing på en 132 kV oljefylt kabelterminering og modellforsøk. Ut fra arbeidet Kan følgende konklusjoner trekkes:

- Resultatene fra fullskalaforsøk tilsier at frie vanndråper i termineringen i seg selv generer lite utladningsaktivitet på kort sikt.
- Krefter som skyldes det elektriske feltet bidrar til å trekke frie vanndråper inn mot konus. Dette gir en høy tetthet dråper langs konusoverflaten. På bakgrunn av disse observasjonene virker det rimelig at vannet kan flyttepotensialet nedover langs konusoverflaten. Dette støttes også av at det ble detektert utladninger på nedre del av konus. Skal det være høy feltstyrke her må dette skyldes kontakt med kabelisolasjonen på oversiden av konus.
- Utladningsmåling gjort på modellforsøk der det er elektrisk kontakt mellom jordet vannfilm og kabelisolasjon viser lave utladninger(30-40 pC) ved relevante feltstyrker. Sammen med fullskalaforsøket viser dette at vanninntrengning ikke nødvendigvis kan påvises med utladningsmålinger.
- Havari av modellkabel viser stor likhet med fullskala havarier i felt både når det gjelder havaristed(høyde over konus) og degraderingen på overflaten. Dette støtter opp om resultatene fra modellforsøkene gjennomført i dette prosjektet.

7.1 Forslag til videre arbeid

En naturlig videreføring av arbeidet gjort i denne masteroppgave er å undersøke den videre utviklingen i fullskalaforsøket. Ettersom det begrenset med kunnskap om hvor lang tid det tar før et havari oppstår vil laboratorieresultater være viktige for hvilke tiltak som settes inn for å detektere/ unngå vannlekkasjer i felt. Det er også flere muligheter til å endre både prosedyre og oljetype. Oljens viskositet vil ha stor innvirkning på dråpenes bevegelser, og dermed bidra til at dråpene plasserer seg annerledes enn det som er beskrevet i denne oppgaven.

I dette prosjektet ble det gjort forsøk på å lokalisere utladningene i modellforsøket ved å ta bilde av utladningene i et mørkerom, dette førte ikke frem. En naturlig videreføring vil være å prøve dette forsøket med et mer lyssterkt kamera.

Aldringsforsøkene bar preg av stor spredning i resultatene. I dette prosjektet ble det kun gjennomført 4 parallelle forsøk. Å utvide dette forsøk med flere paralleller og over lenger tid, gjerne koblet opp mot PD-måling vil være mulig. Det vil gi bedre data om hvordan utladningene endrer seg over tid samt sikrer tall i forhold til havarier.

8 Bibliography

- [1] Sverre Hvidsten, "Deteksjon av begynnende havari av 145 kV PEX-kabel endeavslutninger," SINTEF, Trondheim, 2003.
- [2] Geir Birkenes, "Undersøkelse av hvordan vanninntrengning kan lede til havari av oljefylte kabeltermineringer," NTNU, Trondheim, 2009.
- [3] David Hendricks, *Water treatment unit processes: physical and chemical*. USA: Crc Press, 2006.
- [4] Paul Joos and Valentin Fainerman, *Dynamic surface phenomena*. The Netherlands: VSP, 1999.
- [5] J Pellicer, V Garc'ia-Morales, and M J Hern'andez, "Young-Laplace equation in introductory physics courses ," in *TEACHING PHYSICS*. Valencia, Spain, 1999, pp. 126-129.
- [6] Brian W Cherry, *Polymer surfaces.*: Cambridge, 1981.
- [7] Atle Pedersen, *Forces Acting on Water Droplets in Electrically Energized Oil Emulsions*. Trondheim, Norway: NTNU, 2008.
- [8] Herbert Pohl, *Dielectrophoresis*. USA: Cambridge, 1978.
- [9] Thomas Jones, *Electromechanics of Particles.*: Cambridge, 1995.
- [10] Lars Lundgaard, "PARTIELLE UTLADNINGER Begreper, måleteknikk og mulige anvendelser for tilstandskontroll," SINTEF, Trondheim, Teknisk rapport 1996.
- [11] Dieter Kind, *High Voltage Test Techniques*, 2nd ed.: Newnes, 2001.
- [12] Goro Sawa, Atsushi Kanematsu, and Masayuki Ieda, "An Analytical Approach to Empirical Law on the Transition Voltage from Polbüschel to Gleitbüschel using a Transmission Line," *Japanese Journal of Applied Physics*, pp. 1271-1276, 1983.
- [13] Kai Wu and Dissado L. A., "Model for Electrical Tree Initiation in Epoxy Resin," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, August 2005.
- [14] S.S Bamji, Y Chen, and T. Bulinski, "Threshold Voltage for Electrical Tree Inception in Underground HV Transmission Cables," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 27, April 1992.

- [15] Len A Dissado and John C. Fothergill, *Electrical degradation and breakdown in polymers*. UK: Peter Peregrinus, 1992.
- [16] Stian Ingebrigtsen, *The influence of chemical composition on streamer initiation and propagation in dielectric liquids*. Trondheim: NTNU, 2008.
- [17] Omicron. [Online]. <http://www.omicron.at/en/>
- [18] Alcatel, *Kabelboka*.
- [19] Mazel Abdel-Salam, *High- Voltage Engineering*. Ohio, USA, 2000.
- [20] George Keith Batchelo, *An introduction to fluid dynamics*. USA: Cambridge University Press, 2000.
- [21] Webjørn Rekdalsbakken. (2002) Høgskolen i Ålesund. [Online]. <http://fag.hials.no/IE201702/files/Volumstr%C3%B8m.pdf>

Vedlegg 1 Beregning av feltstyrker

1.1 Driftfeltstyrker

For å kunne beregne det elektriske feltet som omslutter en kabel gjøres det antagelser om at feltet er symmetrisk og at det ikke er noen form for urenheter som fører til lokale feltforsterkninger og at kabelen er uendelig lang. Flukstettheten D vil da være konstant på overflata av lederen og ladningen i sentrum gitt av følgende

$$q = \iint D_n dA = D l 2\pi x \quad (1.1)$$

Ved å stokke om på ligning (1.1) og bruke sammenhengen $\vec{D} = \varepsilon \vec{E}$ får en følgende uttrykk for det elektriske feltet

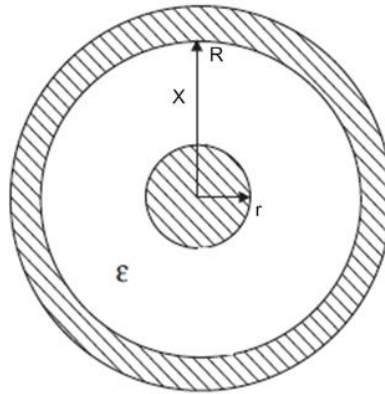
$$E = \frac{q}{2\pi\varepsilon_0\varepsilon_r l x} \quad (1.2)$$

For å finne feltfordelingen tas det utgangspunkt i definisjonen av potensial som er gitt av (1.3):

$$U = \int_r^R E dx = \int_r^R \frac{q}{2\pi\varepsilon l x} dx = \frac{q}{2\pi\varepsilon l} \ln\left(\frac{R}{r}\right) \quad (1.3)$$

Se figur 1 for forklaring til symboler brukt i ligning (1.3). Det spesifiseres at ligning (1.3) gjelder for spenningsdifferansen over et dielektrikum. Ved å sette (1.2) inn i (1.3) fås følgende uttrykk for det elektriske feltet som funksjon av x (avstand fra sentrum):

$$E = \frac{U}{x \ln \frac{R}{r}} \quad (1.4)$$



Figur 1 Dimensjoner på kabel. X aksen er retta ut fra sentrum.

For å avgjøre hvilke spenninger som skal benyttes på testoppsettet settes

$$E_{test}(R_{test}) = E_{kabel}(R_{kabel}) \quad (1.5)$$

Ved å bruke ligning (1.4) og (1.5) finnes følgende sammenheng:

$$U_{test} = \frac{R_{test} \ln\left(\frac{R_{test}}{r_{test}}\right)}{R_{kabel} \ln\left(\frac{R_{kabel}}{r_{kabel}}\right)} U_{kabel} \quad (1.6)$$

For å beregne driftfeltstyrken på PEX overflata korrigeres dimensjonene som følger:

$$D_{isolasjon} = D_{tabell} - 2t_{ytrehalvleder}$$

$$d_{leder} = d_{tabell} + 2t_{indrehalvleder}$$

Der $t_{ytrehalvleder}$ og $t_{indrehalvleder}$ er tykkelsen på henholdsvis ytre og indre halvleder. Halvleder tykkelsen antas å være 1mm for begge. Resultatene er gitt i **Error! Reference source not found..** Dimensjonene på prøveobjektet måles til å være 19,5 mm over isolasjonen og 12 mm over lederen.

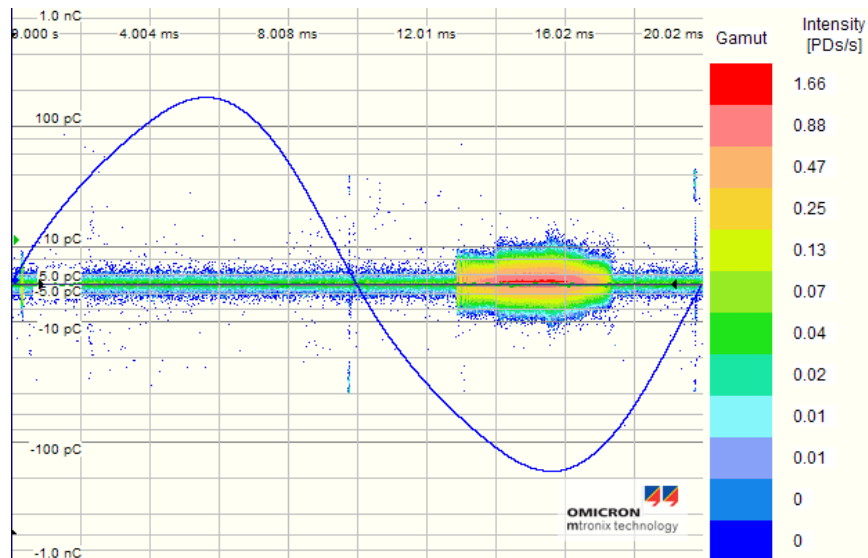
Tabell 1 Feltstyrker

Tverrsnitt[mm²]	Feltstyrke[kV/mm]	Påtrykt spenning i modell[kV]
630	3,32	15,7
800	3,43	16,2
1000	3,51	16,6
1200	3,56	16,9
1600	3,67	17,4

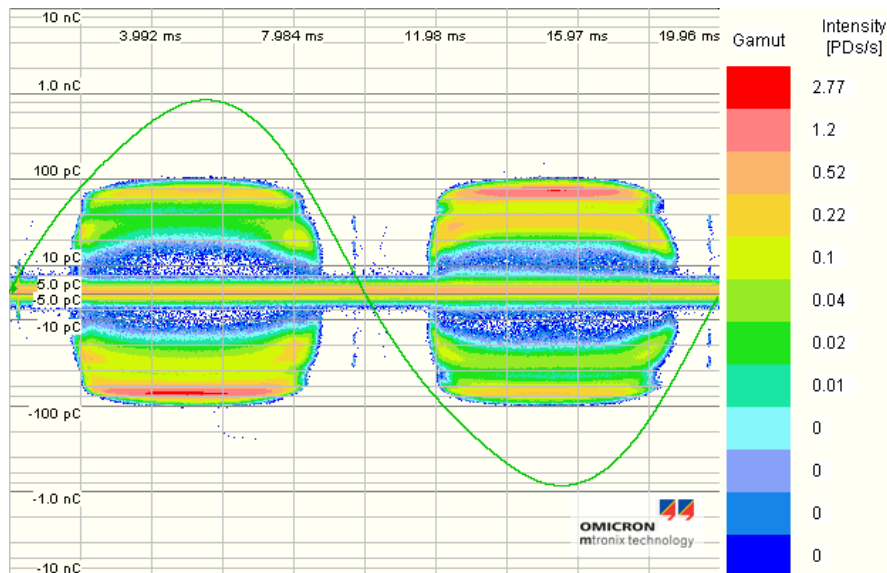
Vedlegg 2 Oversikt over PD-plott

2.1 Fullskalaforsøk

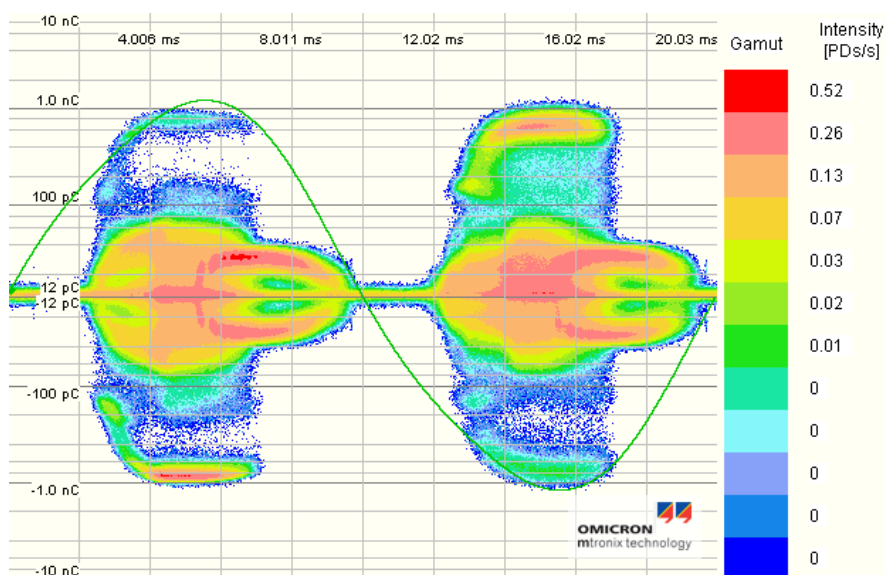
Målingene viste utladningsaktivitet i negativ halvperiode i de første 200 timene. Fra 200 timer frem til 1400 timer var det svært lite utladninger. Fra 1400 timer og frem til 2000 timer var det utladninger i området 50 pC- 1 nC. Etter 2000 timer forsvant utladningene.



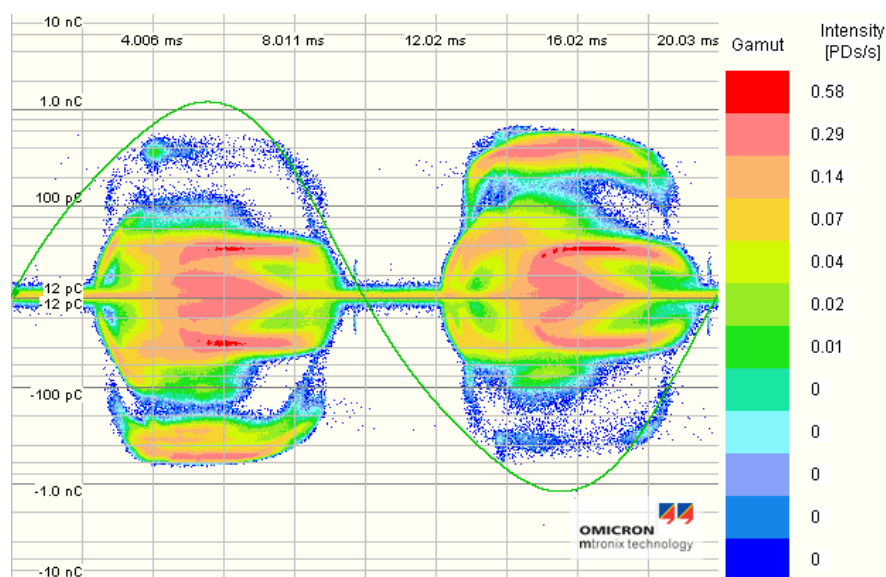
Figur 1 PD-plott etter 70 timer. Logget over en time.



Figur 2 PD-plott etter 1433 timer, utladningsnivå 85 pC. Logget over en time.

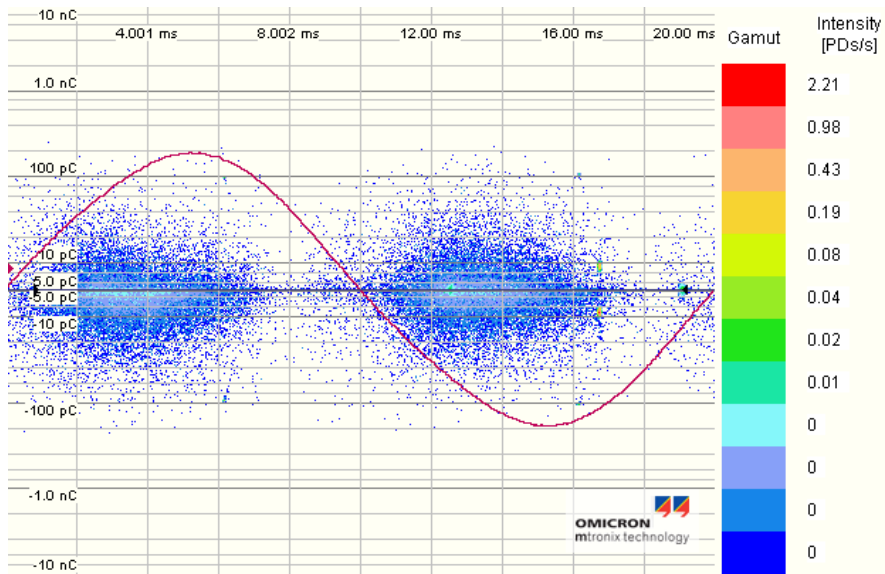


Figur 3 Tatt etter 1630 timer, utladningsnivå 900 pC. Logget over 1 time.

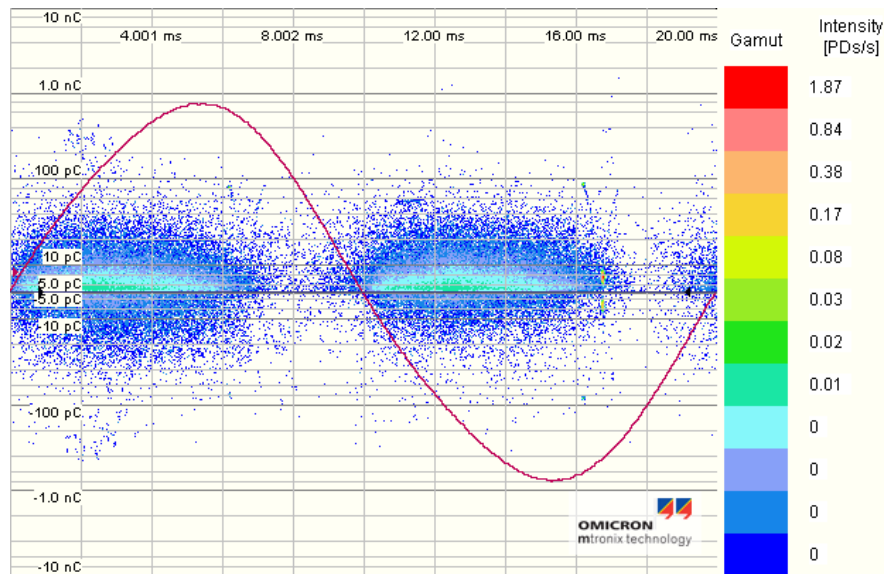


Figur 4 Tatt etter 1748 timer, utladningsnivå 540 pC. Logget over 1 time.

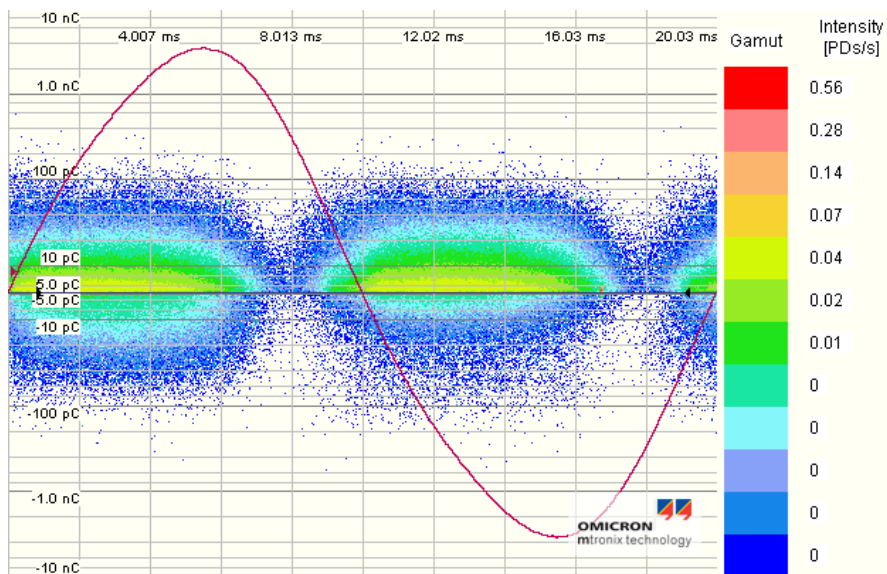
2.2 Modelforsøk



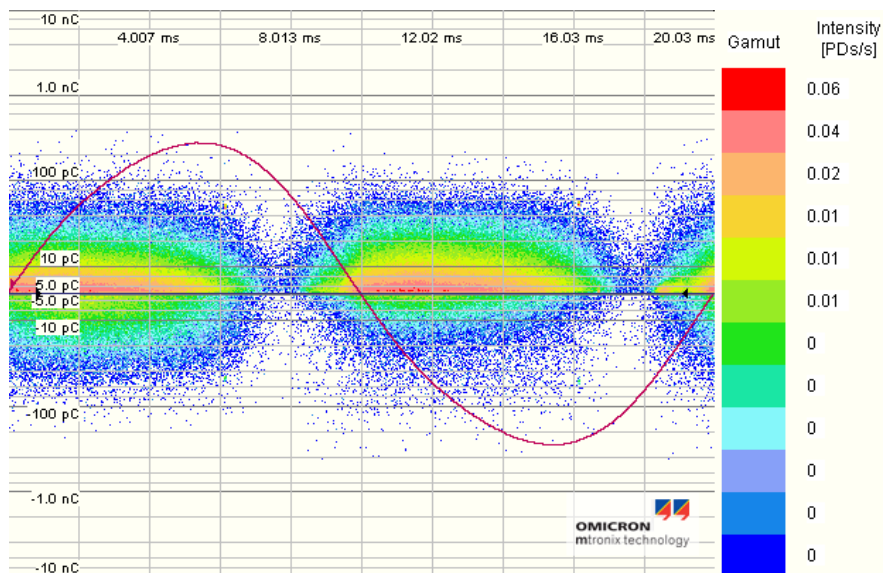
Figur 5 Driftsfeltstyrke 1,27 kV/mm. Loggetid 1 time.



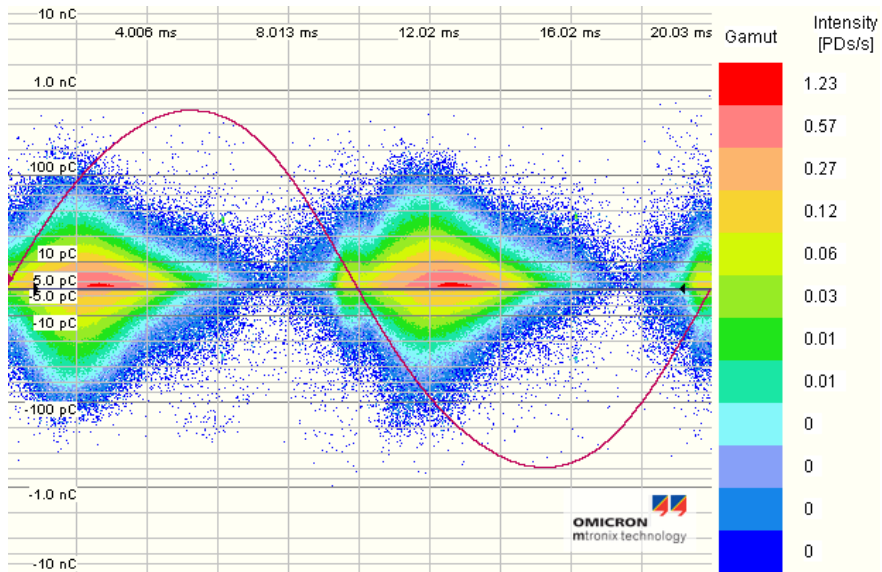
Figur 6 Driftsfeltstyrke 1,9 kV/mm. Loggetid 1 time.



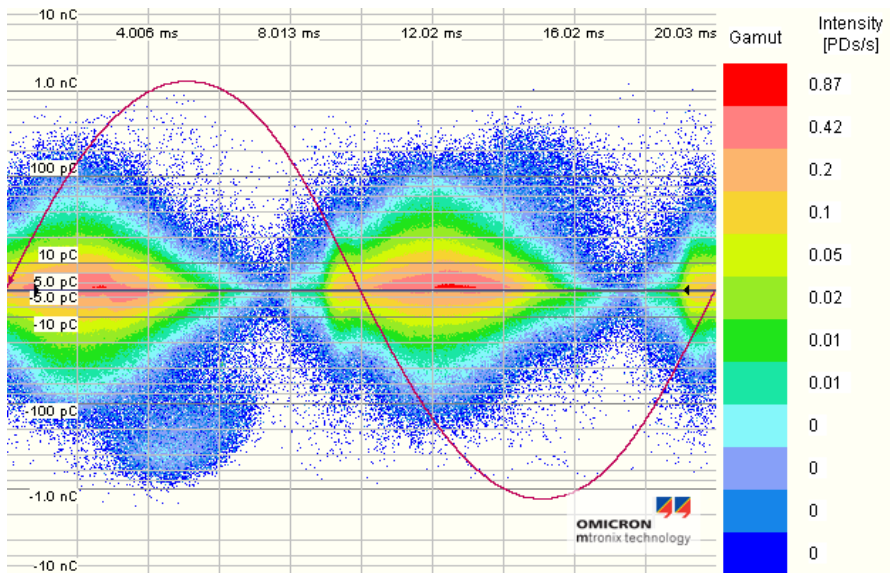
Figur 7 Driftsfeltstyrke 2,54 kV/mm. Loggetid 1 time.



Figur 8 Driftsfeltstyrke 3,17 kV/mm. Loggetid 1 time.



Figur 9 Driftsfeltstyrke 3,8 kV/mm. Loggetid 1 time.



Figur 10 Driftsfeltstyrke 4,43 kV/mm. Loggetid 1 time.

Vedlegg 3: Digitalt vedlegg

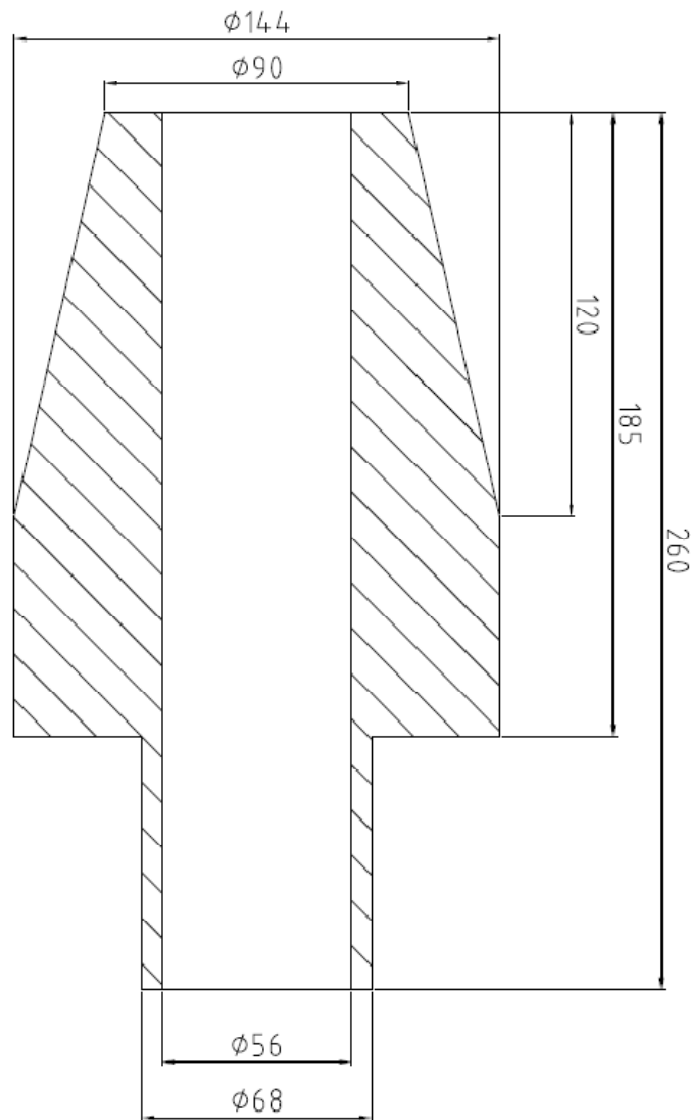
Vedlagt DVD inneholder følgende:

Video av 1. inndrypning i fullskalaforsøk.

Bilder tatt under forsøket.

Bilder av modellforsøk.

Vedlegg 4 Dimensjoner på konus



Figur 1