

Romladningsdistribusjon i PEX HVDC kabelisolasjon - flate prøver og miniatyrkabel

Lars Møllersen Hallsteinsen

Master i energibruk og energiplanlegging
Innlevert: Juni 2012
Hovedveileder: Frank Mauseth, ELKRAFT

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Institutt for elkraftteknikk

Oppgavetekst

Production of electric power from floating wind turbines will be a big on-coming challenge. Numerous Norwegian companies are working on different aspects of floating wind power generation.

The project work will be part of the 5 year project High Voltage AC and DC Subsea Cables for Offshore Wind Farms and Transmission Grid's supported by The Norwegian Research Council (Forskningsrådet). In connection with this project it's desirable to study the space charge distribution within the polymeric HVDC insulation and accordingly the electric field distribution within the polymeric insulation.

The project work is mainly experimental and will consist of measurements on both flat samples and cables. It is of intereset to investigate how DC voltage influence the space charge distribution.

Oppgaven gitt: 27. januar 2012
Hovedveileder: Frank Mauseth, NTNU

Forord

Denne oppgaven er en avsluttende masteroppgave i sivilingeniørstudiet Energi & Miljø. Oppgaven tilsvarer full studieprogresjon ett semester.

Oppgaven er en del av et prosjekt støttet av Norges Forskningsråd med formål å kartlegge romladningsdistribusjon i PEX HVDC kabelisolasjon. Arbeidet ble utført ved Norges tekniske-naturvitenskapelige universitet (NTNU), ved institutt for Elkraftteknikk våren 2012.

Jeg vil gjerne takke min hovedveileder Førsteamanuensis Frank Mauserth ved institutt for Elkraftteknikk, NTNU, samt medveileder Øystein Hestad ved SINTEF Energi AS for all støtte og inspirasjon under arbeidet.

Torbjørn Ve har kommet med gode tips og råd i forbindelse med oppgaven og har vært en god støttespiller under arbeidet.

Jeg vil også rette en takk til Mildrid Selsjord ved SINTEF Energi AS og servicelabben ved institutt for Elkraftteknikk for hjelp og gode råd i forbindelse med praktisk laboratoriearbeid.

Trondheim, 21. juni 2012

Lars Møllersen Hallsteinsen

Sammendrag

Fornybar energi fra offshore vindkraft krever ny infrastruktur for sammenknytning av forbruker og produsent. Denne sammenknytningen kan gjøres ved hjelp av HVDC sjøkabler. En kabeltype som er aktuell å bruke for landføring av den produserte elektriske energien er basert på kryssbundet polyetylen. I kryssbundet polyetylen er det flere aldriingsmekanismer som kan være aktive og føre til redusert levetid for kabelen. En mulig bidragsyter til økt aldring er romladninger. For å bedre kunne forutsi og forbedre levetid for kryssbundede polyetylenkabler er det av interesse å studere romladningsdistribusjonen i de.

Det ble gjennomført målinger på flate prøver og miniatyrkabel. Isolasjonen i flate prøver besto av polyetylenmaterialet LE4201 med elektroder bestående av halvledermaterialet LE0550 som katode og gull som anode. Isolasjonen i miniatyrkabel besto av polyetylenmaterialet LS4201S med halvledermaterialet LE0595 som katode og anode. Isolasjonen i flate prøver var rundt 0.2 mm tykke. Isolasjonen i miniatyrkabel var 1.75 mm tykk. Det ble gjennomført tre måleserier på flate prøver med henholdsvis 15, 20 og 25 kV/mm påtrykt elektrisk feltstyrke. Det ble gjennomført to måleserier på miniatyrkabel med 20 og 25 kV/mm gjennomsnittlig påtrykt elektrisk feltstyrke. Målemetoden som ble brukt for å detektere romladningene er den ikke-destruktive PEA-målemetoden (Pulsed Electro-Acoustic method).

For å oppnå elektroderespons under kalibrering var det nødvendig med høye påtrykte elektriske feltstyrker ved både flate prøver og miniatyrkabel. Den målte elektroderesponsen for flate prøver og miniatyrkabel var lav, med stor signal- til støy-ratio, noe som førte til feilberegnete kalibreringsfaktorer. Disse kalibreringsfaktorene resulterte i forvrengning i fremstilling av akkumulert romladning og feltforsterkning.

Det ble gjort romladningsmålinger i flate prøver og miniatyrkabel med kontinuerlig påtrykt DC-spenning av og på. Amplitudedifferanser mellom spenning av og på i akkumulert romladning ble logget som rådata gjennom PEA-måleoppsettet. Differansene tilsier at det blir gjenværende mer ladninger i LS4201S enn i LE4201 når spenningen påtrykt over isolasjonen blir slått av. Isolasjonen i miniatyrkabelen blir kort tid etter igangsetting av måleseriene mettet av romladninger. Det detekterte romladningssignalet er preget av mye støy fra akustiske refleksjoner generert i grensesjiktene halvleder-isolasjon og halvleder-detekterende elektrode.

Akkumulasjon av romladning i flate prøver er et resultat av injeksjon av elektroner og hull fra elektrodene og feltassistert ionisering av restproduktene fra kryssbindingen av de.

Abstract

Renewable energy from offshore wind power production demands new infrastructure to connect producer and consumer. This connection can be done with use of HVDC sea cables. One type of cable that can be relevant to use for landing the produced electrical energy is based on crosslinked polyethylene. In crosslinked polyethylene are there several ageing mechanisms that can be active and result in reduced lifetime for the cable. A possible contributor to increased ageing is space charges.

There were done measurements on flat samples and miniature cable. The insulation in flat samples consisted of the polyethylene material LE4201 with electrodes consisting of the semiconducting material LE0550 as cathode and gold as anode. The insulation in miniature cable consisted of the polyethylene material LS4201S with the semiconducting material LE0595 as cathode and anode. The insulation thickness in flat samples was approximately 0.2 mm. The insulation thickness in miniature cables was 1.75 mm. There were done three measurement series on flat samples with 15, 20 and 25 kV/mm electrical field strength. There were done two measurement series on miniature cable with 20 and 25 kV/mm average field strength. The method used to detect the space charges in the insulation are the non-destructive PEA-method (Pulsed Electro-Acoustic method).

To achieve responses at the electrodes in the samples under calibration there were necessary to use high electrical field strengths on both flat samples and miniature cable. The measured electrode responses at both flat samples and miniature cable was low, with high signal- to noise-ratio. This resulted in wrong calculated calibration factors. These calibration factors resulted in distortion in the calculated space charge accumulation and field enhancement.

There were done space charge measurements in flat samples and miniature cable with continuous DC-voltage off and on. The amplitude difference between voltage off and on in accumulated space charge were logged as raw-data with the PEA-method. The differences indicate that there remained more charges in LS4201S than in LE4201 when the voltage over the insulation are turned off.

The insulation in miniature cable are saturated with space charges shortly after start-up of the measuring series. The detected space charge signal is affected of much noise from acoustic reflections generated in the borderline between semiconductor-insulation and semiconductor-detecting electrode. Accumulation of space charges in flat samples is a result of injection of electrons and holes from the electrodes and field assisted ionization of the rest products from cross linking of the insulation.

Innhold

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Innledning | 1 |
| 2 | Teori | 3 |
| 2.1 | Det dielektriske materialet | 3 |
| 2.2 | Kryssbundet polyetylen | 3 |
| 2.2.1 | Kryssbinding | 4 |
| 2.2.2 | Restprodukter fra kryssbindingen | 4 |
| 2.2.3 | Inhomogenitet i det kryssbundede materialet | 5 |
| 2.3 | Elektrisk modell | 5 |
| 2.3.1 | Teoretisk bakgrunn | 5 |
| 2.3.2 | Elektrisk feltfordeling for flat prøve og miniatyrkabel | 6 |
| 2.4 | Romladningsakkumulasjon | 7 |
| 2.4.1 | Akkumulasjon av romladning | 7 |
| 2.4.2 | Homoladning | 8 |
| 2.4.3 | Heteroladning | 8 |
| 2.5 | Ladningstransport i dielektrisk materiale | 8 |
| 2.5.1 | Ladningsinjeksjon | 8 |
| 2.5.2 | Ionisk ledning av romladninger | 9 |
| 2.5.3 | Elektronisk ledning av romladninger | 10 |
| 2.6 | PEA-målemetode | 10 |
| 2.6.1 | Akustisk refleksjon og transmisjon | 12 |
| 2.6.2 | Kalibrering | 13 |
| 3 | metode | 15 |
| 3.1 | Tilberedning av flate prøver | 15 |
| 3.1.1 | Tilberedning av halvleder for flate prøver | 15 |
| 3.1.2 | Tilberedning av polyetylen | 16 |
| 3.1.3 | Kryssbinding av halvleder og polyetylen | 16 |
| 3.1.4 | Kondisjonering | 16 |
| 3.1.5 | Måling av tykkelse på flate prøver | 17 |
| 3.1.6 | Ionesputting av gull | 17 |
| 3.2 | Tilberedning av miniatyrkabel | 18 |
| 3.3 | Oppsett for romladningsmåling | 19 |
| 3.3.1 | Måling på flate prøver | 19 |
| 3.3.2 | Måling på miniatyrkabel | 20 |
| 4 | Resultat | 23 |
| 4.1 | Miniatyrkabel | 23 |
| 4.1.1 | Måleserie #K1 - 20 kV/mm | 23 |
| 4.1.2 | Måleserie #K2 - 25kV/mm | 27 |
| 4.2 | Flate prøver | 31 |
| 4.2.1 | Måleserie #F1 - 15 kV/mm | 31 |
| 4.2.2 | Måleserie #F2 - 20 kV/mm | 35 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 4.2.3 | Måleserie #F3 - 25 kV/mm | 39 |
| 5 | Diskusjon | 43 |
| 5.1 | Kalibrering | 43 |
| 5.2 | Romladningsakkumulasjon og feltutvikling | 44 |
| 5.2.1 | Miniatyrkabel | 44 |
| 5.2.2 | Flate prøver | 45 |
| 5.3 | Feilkilder | 47 |
| 6 | konklusjon og videre arbeid | 49 |
| 6.1 | konklusjon | 49 |
| 6.2 | Videre arbeid | 49 |
| A | Vedlegg | 53 |

1 Innledning

Dagens samfunn har et stadig økende behov for elektrisk energi. Mye av den elektriske energien som produseres idag kommer fra ikke-fornybare energikilder. Ikke-fornybare energikilder har et høyt utslipp av drivhusgasser, som igjen fører til global oppvarming. Med bakgrunn i økt konsum av elektrisk energi og ønsket reduksjon i utslipp av drivhusgasser, er det mange aktører i energibransjen som utvikler konsepter for offshore vindkraftproduksjon.

Fornybar energi fra offshore vindkraft er en form for energiproduksjon som krever ny infrastruktur for sammenknytting av forbruker og produsent. Denne sammenknytningen mellom forbruker og produsent kan gjøres ved hjelp av HVDC-sjøkabler. Da slike kabler er kostbare å produsere og installere og svært tidkrevende å reparere er det ønskelig med lang levetid og lite feil.

En kabeltype som er aktuell å bruke for landføring av energi produsert av offshore vindmøller har kabelisolasjon basert på kryssbundet polyetylen. I kryssbundet polyetylen er det flere aldringsmekanismer som kan være aktive og føre til redusert levetid og hyppig feil. En mulig bidragsyter til økt aldring er romladninger. Romladninger vil kunne føre til lokale elektriske feltforsterkninger i isolasjonen og videre virke som en katalysator for andre feltavhengige aldringsmekanismer. For å bedre kunne forutsi og forbedre levetid for kryssbundede polyetylenkabler er det av interesse å studere romladningsdistribusjonen i de.

Denne rapporten er produsert på bakgrunn av litteraturstudie og laboratoriarbeid. I laboratorium har flate prøver blitt produsert og miniatyrkabel klargjort. Disse har videre blitt spenningsatt med DC-spenning over en gitt tidsperiode, hvor det systematisk har blitt gjort målinger av romladningsdistribusjonen i de. Målingene utføres med PEA-målemetode. Målemetoden er en ikke-destruktiv målemetode hvor måleprinsippet er basert på akustiske trykkbølger generert av akkumulerte romladninger ved påtrykt elektrisk pulserende felt.

Målt romladningsdistribusjon logges som rådata og behandles algoritmisk for å danne et bilde av romladningens distribusjon i isolasjonen. Videre blir måledataene analysert og sammenlignet med tilgjengelig faglitteratur og forskning.

2 Teori

2.1 Det dielektriske materialet

Opgaven til et dielektrisk materiale er å isolere en elektrisk leder fra omgivelsene, og hindre elektrisk strøm å flyte gjennom de. Et dielektrisk materiale klassifiseres av flere parametere som totalt vil utgjøre den dielektriske styrken til materialet. Polymerbaserte dielektriske materialer er mye brukt i høyspentanlegg. Polymerer som dielektrisk materiale er sjelden brukt i ren form, og består av flere tilsetningskomponenter. Disse tilsetningskomponentene deles inn i tre hovedkategorier[10]:

1. Katalysatorkomponenter er komponenter som på forskjellige måter gir polymeren ønskede egenskapene. Et eksempel er peroksider som kan brukes i kryssbindingsprosessen, se kapittel 2.2.
2. Tilsetningsstoffer (<10 %) tilsettes polymeren for å påvirke dets egenskaper under bruk, men endrer samtidig ikke polymerstrukturen. Dette inkluderer smøremidler, stabilisatorer for beskyttelse mot ultrafiolett- og varmestråling, antioksidanter mot oksidering, flammehemmende stoffer, antimikrobielle stoffer og fargepigmenter.
3. Sammensatte ingredienser(10-70 %) brukes som fyllstoff og myknere. Fyllstoff reduserer mengden polymer som brukes i det dielektriske materialet og reduserer påfølgende kostnadene. Fyllstoff sørger også for forbedret varmeresistens og forbedrede mekaniske egenskaper. Myknere brukes for å redusere skjørheten til det endelige dielektriske materialet.

En polymer som er mye brukt i dielektriske materialer er polyetylen(PE). I høyspentanlegg brukes polyetylen som regel i kryssbundet form.

2.2 Kryssbundet polyetylen

Polyetylen består i hovedsak av langkjedede karbon- og hydrogenbaserte polymerer[10]. Disse kjedene er ikke direkte knyttet opp mot hverandre, men holdes sammen av en sammenfiltring mellom kjedene. Denne sammenfiltringen kommer av svake intermolekulære krefter i mer krystalliserte områder av polyetylenen. Hvis polyetylenen tilføres varmeenergi vil molekylene bevege seg relativt fritt i forhold til hverandre og polymerkjedene vil atskilles. Dette gjør at polyetylenen ikke vil være like motstandsdyktig mot strekkrefter ved høye temperaturer og kan ved svært høye temperaturer smelte helt og miste all holdfasthet.

2.2.1 Kryssbinding

Ved kryssbinding lages det direkte band mellom karbonmolekylene i de individuelle polyetylenkjedene. Dette resulterer i redusert bevegelse for polyetylenkjedene relativt til hverandre. Når den nå kryssbundede polyetylenen (PEX) får tilført varmeenergi vil ikke polyetylenkjedene være i stand til å bevege på seg og er da mulig å bruke under høyere driftstemperaturer enn PE. Kryssbinding av polymerer kan oppnås ved å bruke en av tre forskjellige metoder[10]:

1. Ved å utsette polymeren for stråling vil det dannes kryssbindinger mellom molekylene. Denne metoden brukes mest på tynne prøver, og er en lite brukt metode ved produksjon av komponenter til høyspentanlegg.
2. En kjemisk herder kan tilsettes for å danne kryssbinding. Denne kryssbindingsmetoden kan brukes ved romtemperatur. Dette gir gode dielektriske egenskaper og er godt egnet til høyspentbrytere.
3. Ved tilsetning av katalysatorer i polymeren vil den kryssbindes ved å utsette materialet for varme og trykk. De mest brukte katalysatorene er peroksider og tilsettes i mengde 1-2 % av den totale massen. Kryssbundede polymerer kalles 'elastomer' da den formen de har ved kryssbinding er låst og kan ikke reverseres eller smeltes om etter at kryssbindingen er gjennomført. Før polymeren kryssbindes kan den smeltes og omformes etter behov, og kalles 'termoplastisk'. Kryssbinding ved tilsetning av katalysatorer i polymeren er den mest brukte teknikken for produksjon av PEX til høyspentanlegg og kabler.

Halvledermaterialer brukt i høyspentanlegg sammen med polyetylen kan være sammensatte kryssbindbare polyetylen. Disse brukes til halvledende skjerming av kryssbundede kabler. Halvleder materialet er tilsatt komponenter som gjør den ohmske motstanden i materialet lavere.

2.2.2 Restprodukter fra kryssbindingen

Ved kryssbinding av polyetylen vil det oppstå restprodukter i materialet. Restproduktene vil kunne legge seg både i grensesjiktet mellom elektrode og polyetylenen, samt i bulk. De vil kunne påvirke de mekaniske og dielektriske egenskapene til materialet og mistenkes å være en av hovedbidragsyterne til akkumulasjon av romladninger i PEX[9]. De tre vanligste restproduktene er acetophenone, α -metylstyrene og cumyl-alkohol.

2.2.3 Inhomogenitet i det kryssbundede materialet

Prosessene bak degradering og etterhvert sammenbrudd i et dielektrisk materiale starter ofte i de inhomogene områdene i materialet. Disse inhomogene områdene befinner seg enten i bulk av isolator, eller i grensesikt mellom elektrode og isolator. Typiske inhomogeniteter årsakes av[10]:

1. Aberrasjon i elektrodeoverflaten. Dette kan være små splinter på en elektrisk leder som penetrerer eller strekker/skraper opp overflaten på polymeren.
2. Områder i polymeren med hullrom som stammer fra morfologiske ujevnheter i materialet. Disse submikrone hullrommene er typiske 10 nm store, og stammer fra forflytning av tilsetningsstoffer tilsatt polymeren. Disse hullrommene påvirker kun langsiktige degraderingsprosesser. Større supermikrone hullrom stammer fra ufullkomment trykk under kryssbinding ved høy temperatur.
3. Urenheter i isolatoren, som koagulering av fyllstoff og uheldig blanding av tilsetningskomponenter i polymerbasert isolator.

Slike ufullkommenheter vil gi opphav til lokale forandringer i elektrodegeometrien, eller forandringer i dielektriske, mekaniske og termiske egenskaper ved materialet. Dette vil kunne resultere i ikkeuniforme elektriske og mekaniske påkjenninger og temperaturgradienter, som vil resultere i økt sannsynlighet for sammenbrudd. Inhomogenitet vil kunne gi opphav til akkumulasjon av romlandinger som igjen vil føre til elektrisk feltforvringning.

2.3 Elektrisk modell

Ved påtrykt DC-spenning over et polymerbasert dielektrisk materiale ledes det en liten strøm gjennom det[16]. Ledningsevnen for disse materialene er typisk $10^{-16} - 10^{-18} \frac{S}{m}$.

2.3.1 Teoretisk bakgrunn

Den elektriske oppførselen til dielektriske materialer og strømmen som går gjennom de kan beskrives ut fra gitte ligninger[2]:

$$\vec{j} = \sigma \vec{E} \quad \text{Ohms lov} \quad (2.1)$$

Hvor \vec{j} er strømtettheten gjennom materialet, σ er elektrisk ledningsevne og \vec{E} er elektrisk feltstyrke.

Gauss' lov sier hvordan ladninger danner elektrisk felt:

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad \text{Gauss lov} \quad (2.2)$$

Hvor ϵ er dielektrisk permittivitet og \vec{D} er elektrisk flukstetthet.

Gauss' lov i kombinasjon med en ekstern påtrykt DC-spenning, U , over isolasjonsmaterialet, som oppfyller ligning (2.3), vil resultere i en beskrivelse av elektrisk felt-forsterkning og -distribusjon i isolasjonsmaterialet. Denne felt-forsterkningen vil være avhengig av romladningstettheten, ρ , i materialet, se ligning (2.4).

$$E = -\nabla U \quad (2.3)$$

$$\nabla^2 U = -\frac{\rho}{\epsilon} \quad (2.4)$$

$$\nabla \cdot \vec{j} + \frac{\partial \rho(x)}{\partial t} = 0 \quad \text{Strømkontinuitetsligning} \quad (2.5)$$

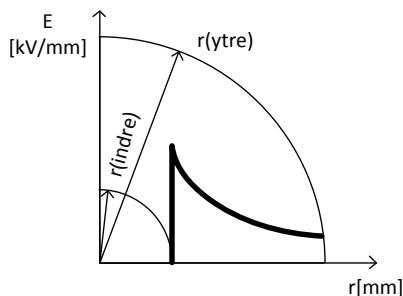
Akkumulasjon av romladning kan uttrykkes ved strømkontinuitetsligningen. Denne ligningen utgrees fra Maxwells ligninger, og er ikke en selvstendig hypotese. Ligningen tilsier at når divergensen av strømtettheten, $\nabla \cdot \vec{j}$, varierer fra 0 i et dielektrisk materiale vil det akkumuleres romladninger i det.

2.3.2 Elektrisk feltfordeling for flat prøve og miniatyrkabel

Feltdistribusjonen som den påtrykte DC-spenningen setter opp er avhengig av geometrien til elektrodene. Her skilles det mellom homogen feltfordeling og radiell feltfordeling som presentert henholdsvis i ligning (2.6) og (2.7), se figur 1. Den radielle feltfordelingen vil fordele seg inhomogent og omvendt proporsjonalt med radiusen. Feltstyrken vil være størst ved r_{indre} og minst ved r_{ytre} .

$$E = \frac{U}{d} \quad \text{Homogen feltfordeling} \quad (2.6)$$

$$E = \frac{U}{r \ln \frac{r_{ytre}}{r_{indre}}} \quad \text{Radiell feltfordeling} \quad (2.7)$$



Figur 1 – Tverrsnitt av miniatyrkabel som viser radiell feltfordeling i kabelisolasjon. Elektrisk leder har radius r_{indre} og dielektrisk materiale har tykkelse $r_{ytre} - r_{indre}$. Feltstyrken vil være størst ved r_{indre} og minst ved r_{ytre} .

2.4 Romladningsakkumulasjon

Romladninger som er tilstede i et dielektrisk materiale kan være elektro-ner(negativt ladet), hull(positivt ladet), eller ioner [10].

2.4.1 Akkumulasjon av romladning

Akkumulasjon av romladninger oppstår når utvinningshastigheten av romladninger i et dielektrisk materiale er lavere enn injeksjonen og akkumulasjonen av romladninger[1], noe som sees ut fra ligning (2.5).

Akkumulasjonen kan oppstå på grunn av diffusjon, drift, generering og bevegelse av ladninger og på grunn av feller som “fanger” ladningene. Hvilke ledningsmekanismer som er aktive er avhengig av hvilke type ladninger som er tilstedeværende, som igjen er avhengig av frekvens og styrke på det påtrykte elektriske feltet. Romladninger er også avhengig av elektrodemateriale, elektrodekonfigurasjon, dielektrisk materiale og miljømessige faktorer som hydrostatisk trykk, luftfuktighet og atmosfæriske gasser.

Den gjennomsnittlige romladningstettheten som er tilstedeværende i testobjektet kalkuleres ut fra ligning:

$$\rho_{gj.snitt} = \int_0^d \rho(x) dx \quad (2.8)$$

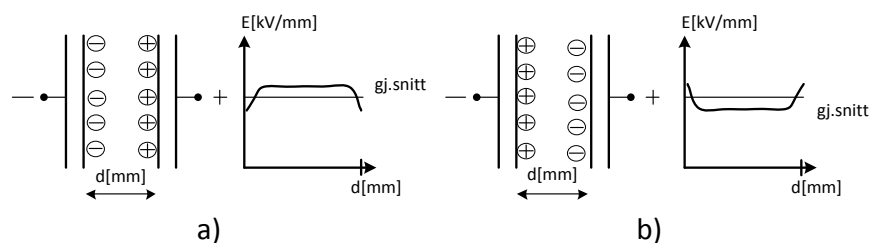
$\rho_{gj.snitt}$ er integralet av total mengde romladning tilstede i det dielektriske materialet, som har en total tykkelse, d .

2.4.2 Homoladning

Romladninger akkumulert nært en elektrode med samme polaritet som elektrodene kalles homoladning. Homoladninger bidrar med økt elektrisk felt i bulk av prøven og redusert elektrisk felt nært elektrodene, se figur 2.

2.4.3 Heteroladning

Romladninger akkumulert nært en elektrode med motsatt polaritet som elektrodene kalles heteroladning. Heteroladninger bidrar med redusert elektrisk felt i bulk av prøven og økt elektrisk felt nært elektrodene, se figur 2.



Figur 2 – (a) Homoakkumulasjon - akkumulasjon av romladninger nært elektrodene med samme polaritet som elektrodene. (b) Heteroakkumulasjon - akkumulasjon av romladninger nært elektrodene med motsatt polaritet som elektrodene.

2.5 Ladningstransport i dielektrisk materiale

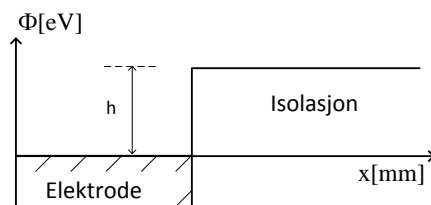
Romladninger som detekteres i et dielektrisk materiale vil i hovedsak implisere at elektriske ladninger migrerer fra en elektrode til en annen ved påtrykt elektrisk felt[17]. Migreringen av ladninger beskrives av forskjellige ledningsmekanismer. Disse ledningsmekanismene omhandler injeksjon av ladninger fra elektrodene, ledning av ladninger gjennom det dielektriske materialet og ekstraksjon av ladning til elektrodene. Hvilke mekanismer som aktiverer en spesiell ledningsmekanisme avhenger av mange faktorer. Dette er faktorer som påtrykt elektrisk felt, E , avstand mellom elektrodene, d , nominell driftstemperatur i materialet, T , og de kjemiske parametrene til materialet hvor ladningene strømmer igjennom.

2.5.1 Ladningsinjeksjon

Injeksjon og ekstraksjon av ladninger mellom elektroder og testobjekt er avhengig av elektrodematerialet, kontaktrykk mellom elektroder, testobjektet,

elektrodekonfigurasjon, temperatur, overflatedefekter i testobjektet og valg av dielektrisk materiale[6].

Injeksjon av ladninger fra elektroder til testobjekt kan beskrives med Fowler-Nordheim- og Schottky-injeksjon[10]. For begge disse injeksjonsmekanismene må ladningene få tilført nok energi slik at de overgår den potensielle energibarrieren som vil hindre ladningene å trenge inn i isolasjonen fra elektrodene, se figur 3. Den potensielle energibarrieren som må overvinnes for å injisere ladning i isolasjonen, ϕ , har enhet elektronvolt, eV. En elektronvolt er mengden kinetisk energi et elektron tilføres når det akselereres mellom et elektrisk potensiale på en volt.



Figur 3 – Potensiell energibarrier, h , som må overvinnes for å injisere en ladning inn i isolasjonen(x -retning) fra en elektrode.

2.5.2 Ionisk ledning av romladninger

Ioner kan dannes i grensesnittet mellom elektrode og isolasjon og inne i prøven, eller være tilstede i isolasjonen før spenningssetting. Dannelsen av ioner skjer ved elektrolytisk dissosiasjon, eller ved dekomponering av elektroder og isolasjonsmateriale[10]. For isolasjon med metallelektroder vil ionisk DC-ledning ikke kunne pågå over tid uten begrensninger da denne ledningsmekanismen transporterer masse og vil være avhengig av dannelsen av ioner da metallelektroder kun bidrar med elektroner eller rekombinasjon av hull.

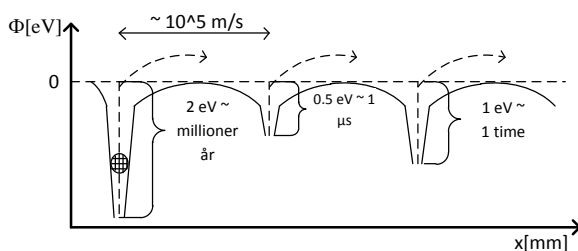
Det er i hovedsak to forskjellige ioniske ledningsmekanismer; indre ionisk ledning og ytre ionisk ledning. Indre ionisk ledning er dissosiasjon av hovedgrupper eller sidegrupper fulgt av protoner eller elektroner gjennom hydrogenbundede nettverk av polymerer. Ytre ionisk ledning består av ioner som ikke kommer fra selve prøvematerialet, men kommer fra tilsetningsstoffer eller restprodukter. Ytre ionisk ledning vil kunne være aktiv i prøver med oppløste tilsetninger som antioksidanter og restprodukter fra kryssbindingen.

2.5.3 Elektronisk ledning av romladninger

Elektronisk ledning består av elektrontransport og hulltransport. Elektroner er negativt ladet, og hull er positivt ladet. Elektronisk ledning finner sted langs polyetylenkjeder[10]. Polyetylen består av molekyllenker som har naturlige defekter. Mellom disse defektene, og mellom polyetylenmolekyler kan elektroner og hull fanges. Elektroner kan fanges av ikke-ioniserte mottakere eller ioniserte donorer. Hull fanges av ikke-ioniserte donorer eller ioniserte mottakere.

Ladninger fraktes av polaroner, som er quasipartikler sammensatt av ladninger og et polariseringsfelt. Ladningene må overvinne energibarrierer med energipotensiale for å unnsnippe fellene de er fanget i. Energipotensialet som må overvinnnes vil variere ut fra hvilke mekanismer som forårsaker fellene. Energien som må tilføres ladningene for å unnsnippe fellene består av termisk og fononsk stimulering. Fononsk stimulering er en kollektiv stimulering i et periodisk elastisk arrangement av atomer eller molekyler i en fast masse. Denne ledningsmekanismen refereres til som 'hopping'. Energibarrieren som må overvinnnes måles i elektronvolt, eV.

En annen ledningsmekanisme for elektroner og hull er kvantemekanisk tunnelling. Ved smale fysiske barrierer i polyetylenet, typisk ned til 1nm, er det en sannsynlighet for at elektronet plutselig vil flytte seg fra ene siden til den andre siden av barrieren.



Figur 4 – Skjematisk forklaring for ladningsmekanismen 'hopping' hvor ladningene må overvinne et energipotensiale for å unnsnippe feller under bevegelse gjennom det dielektriske materialet[1].

2.6 PEA-målemetode

For detektering av romladninger i flate prøver og miniatyrkabel brukes den ikke-destruktive PEA-metoden (Pulsed Electro-Acoustic method).

Ved påtrykt DC-spenning, U , over en prøve med tykkelse, d , vil det distribueres romladninger, $\rho(x)$, i prøven over tid. Se kapittel 2.4, ligning (2.5) og figur 5. Prøveobjektet er plassert mellom elektrodene, hvor det blir på-

trykt en høyspent pulsspenning, $U_p(t)$, når den er spenningsløs fra den kontinuerlige påtrykte DC-spenningen. Pulsspenningen resulterer i et påtrykt pulserende elektrisk felt, $e(t)$, over prøveobjektet. Det påtrykte elektriske feltet vil påvirke eventuelle akkumulerte romladninger som er akkumulert i prøveobjektet over en utstrekning, Δx , med en elektrisk kraft, $f(z,t)$ [13]:

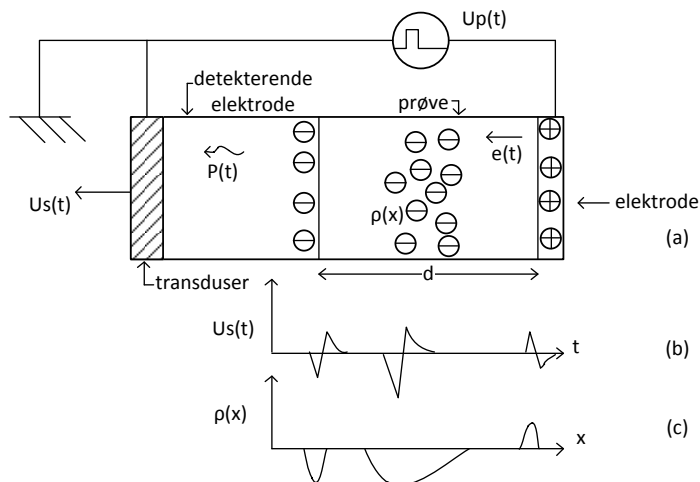
$$\Delta f(x,t) = \rho(x) \cdot \Delta x \cdot e(t) \quad (2.9)$$

Den elektriske kraften genererer trykkløper, $P(t)$. Disse trykkløperne transporteres gjennom prøveobjektet og detekterende elektrode frem til transduseren i PEA-cellen med lydets hastighet. I transduseren blir det akustiske signalet omgjort til et elektrisk tidsavhengig signal, $U_s(t)$, og lagres som rådata. Strekningen trykkløperne tilbakelegger beskrives ut fra følgende ligning:

$$s = v_{lyd} \cdot t \quad (2.10)$$

Hvor s er strekning, v_{lyd} er lydets fart og t er tid.

Det elektrisk tidsavhengige signalet konverteres om til et ladningssignal, $\rho(x)$, ved bruk av algoritrisk databehandling, som resulterer i målt romladningsfordeling og feltforsterkning i testobjektet.



Figur 5 – PEA-målesystem for detektering av romladninger. **(a)** Akustiske bølger genereres i ladningsslag både ved elektrodene og inne i prøven når den blir utsatt for en pulsspenning, $U_p(t)$. **(b)** Transduseren i PEA-cellen omformer de akustiske bølgerne til et elektrisk tidsavhengig signal, $U_s(t)$. **(c)** Ved bruk av algoritrisk databehandling blir det elektriske tidsavhengige signalet omgjort til et romlig bilde av akkumulerte ladninger, $\rho(x)$, i prøven.

2.6.1 Akustisk refleksjon og transmisjon

Et påtrykt pulserende elektrisk felt over en flat prøve eller miniatyrkabel vil påvirke tilstedeværende romladninger med en elektrisk kraft. Akustiske trykkbølger generert av den elektriske kraften vil ha hastighet i materialet gitt av prøvens materialparametre [2], se tabell 1. Trykkbølgene som genereres vil forflytte seg mot begge elektroder. Transduseren i detekterende elektrode vil registrere trykkbølgene som sendes direkte mot den. Transduseren vil ikke registrere trykkbølger sendt mot motstående elektrode, med mindre disse trykkbølgene blir reflektert. Refleksjon skjer i hovedsak i grensesjiktet mellom materialer.

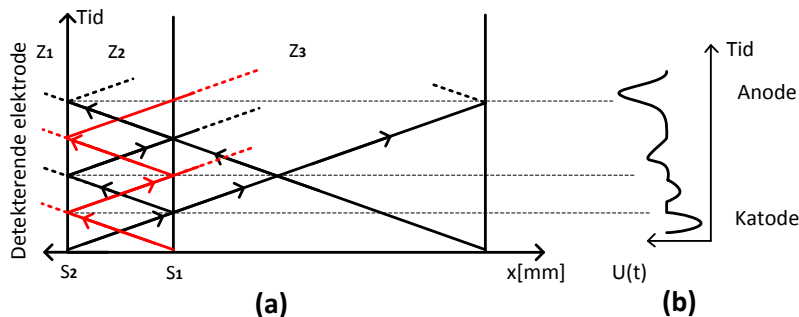
Tabell 1 – Akustiske parametre for materialer brukt i PEA-målinger.

| Material | Lydens hastighet[m/s] | Akustisk impedans [Kg·m ⁻² · s ⁻¹] |
|-----------|-----------------------|--|
| PEX | 2000 | 1.8·10 ⁶ |
| halvleder | 2300 | 2.5·10 ⁶ |

Refleksjoner i grensesjikt mellom to materialer oppstår når de har forskjellige akustiske impedansverdier. Den akustiske impedansen til materialene kan defineres som følger[2]:

$$Z_i = \delta_i \cdot v_i \quad (2.11)$$

Z_i er akustisk impedans, δ_i er massetettheten til materialet og v_i er lydens hastighet i materialet. Refleksjonene oppstår når en akustisk bølge passerer fra det ene materialet til det andre og $Z_1 \neq Z_2 \neq Z_3$, se figur 6. Refleksjoner



Figur 6 – (a) Refleksjonsdiagram med vandreølger som kommer til et punkt S_n , i materialet hvor bølgeimpedansen endres fra en verdi til en annen og refleksjoner oppstår. (b) Akustiske bølger som treffer detekterende elektrode lagres som et tidsavhengig spenningsignal(rådata).

2.6.2 Kalibrering

Kalibrering av målt romladningssignal(rådata) gjøres på dekonvolert data.

Attenuasjon og dispersjon av akustiske bølger

Isolasjonsmaterialer er ikke-ideelle dispersive materialer som har akustiske tap[2]. En akustisk bølge som forflytter seg gjennom isolasjonen vil få synkende amplitudeverdier og er frekvensavhengig. Som et resultat vil det akustiske signalet bli mer attenuert jo lengre strekning det må forflytte seg over i isolasjonen.

Kalibreringsfaktor

For å prosessere det tidsavhengige spenningssignalet lagret som rådata om til et kalibrert romladningsplott må det defineres en kalibreringsfaktor[2]:

$$K_{cal} = \frac{\sigma_0}{U_{max} \Delta t} \quad (2.12)$$

Hvor σ_0 er overflateladning på detekterende elektrode, Δt er bredden og U_{max} er amplitudeverdien.

Kalibreringsmålinger utføres ved å påtrykke en lav DC-spenning, relativt iforhold til kontinuerlig DC-spenning, over prøven for å unngå akkumulasjon av romladninger i den. Kalibreringsfaktoren brukes videre for å konvertere rådata om til romladningssignal.

3 metode

Målingene som presenteres i denne rapporten er gjort på kryssbundet polyetylen(PEX). Det gjennomføres måleserier på både flate prøver og miniatyrkabler. Flate prøver består av polyetylenmaterialet LE4201, har elektroder bestående av halvledermaterialet LE0550 som katode og gull som anode. Miniatyrkabelen består av polyetylenmaterialet LS4201S med halvleder materiale LE0595 som katode og anode.

3.1 Tilberedning av flate prøver

Tilberedning av flate prøver er en prosess som foregår igjennom flere ledd over lengre tid. Prosessen begynner med utvalgte råstoffer i form av pellets og ender opp som ferdige prøver klar til bruk. Flate prøver består av et halvlederelement og et polyetylenelement som er kryssbundet sammen. Etter kryssbindingen utgasses prøvene og pådampes gull før de spenningssettes.

3.1.1 Tilberedning av halvleder for flate prøver

Halvledermaterialet i bruk ved flate prøveobjekter er LE0550. LE0550 er en svart polyetylenbasert halvleder som er ment for skjerming av HVDC kabler. Halvlederen er mulig å kryssbinde.

Halvlederen kommer i pelletsform og plasseres i vakuumskap i 72 timer ved 90 °C. Dette gjøres for å redusere mengden fuktighet i pelletsen til et minimum. Videre blir pelletsen valset. Før valsen taes i bruk rengjøres den grundig for å oppnå høyest mulig renhet i prøveobjektene hvor halvlederen skal brukes. Valsing og ekstrudering av LE0550 gir tilnærmet samme resultat, men valsing er mindre arbeidsomt. Valsingen gjøres mellom to valseruller som forvarmes til henholdsvis 105 °C og 115 °C. Pelletsen tømmes ned mellom rullene som roterer mot hverandre. Avstanden mellom valserullene er justerbar og kan stilles inn slik at ønsket tykkelse på halvlederen oppnås. Ved oppstart er avstanden mellom de ca 1.5 mm. Avstanden mellom valsene reduseres gradvis til ønsket tykkelse er oppnådd. Endelig tykkelse på den valsed halvlederen er ca 0.5 mm. Med en temperaturdifferanse mellom valserullene vil all halvledermateriale feste seg på den ene av de to. Når valsingen er gjennomført kjøles halvlederen og rullene ned til ca 50 °C før halvlederen taes av valsen. Nedkjølingen gjøres ved å slå av varmeinduseringen i valsene.

Når halvlederen er ferdig valset er den klar for støping etter ønsket dimensjon. Den klippes opp i biter på ca to gram. Disse halvlederbitene plasseres i pressformer som er rengjort under flowbenk på forhånd. Pressformene har diameter 10 cm, og dybde 0.25 mm. For å holde de ferdig pressede halvlederprøvene renest mulig plasseres det en isopropanolvasket plastfilm oppå

pressformene. Videre plasseres pressformene i forhåndsoppvarmet presse. For trykk og temperaturer ved pressing, se tabell 2.

Tabell 2 – Trykk og temperatur ved støping av halvleder og polyetylen. Støpingen kryssbinder ikke materialet.

| Prosess | Trykk[tonn] | Temperatur[°C] | Tid[min] |
|-------------|-------------|----------------|----------|
| Lavtrykk | 2,5 | 117 | 8 |
| Høytrykk | 25 | 117 | 2 |
| Vannkjøling | 25 | av | 10 |

3.1.2 Tilberedning av polyetylen

Polymeren som brukes i flate prøveobjekter er polyetylenen LE4201. Polyetylenen kommer i pelletsform og må ekstruderes før den kan støpes om til ønsket fasong. For detaljert beskrivelse av ekstruderingen, se [8].

Den ferdig ekstruderte polyetylenen klippes opp i biter på ca to gram. De oppklippede polyetylenbitene plasseres i pressformer som er rengjort under flowbenk på forhånd. Pressformene har diameter 10 cm og dybde 0.25 mm. En isopropanolvasket plastfilm plasseres oppå pressformene. Pressformene blir så lagt i en forhåndsoppvarmet presse for pressing. For trykk og temperaturer, se tabell 2.

3.1.3 Kryssbinding av halvleder og polyetylen

Halvleder og polyetylen kryssbindes sammen. Kryssbindingen gjennomføres ved å utsette prøven for temperaturer og trykk som gitt i tabell 3. Halvleder og polyetylen er allerede presset til forhåndsbestemte størrelser og legges sammen i grundig rengjorte pressformer under flowbenk. Formene har dybde 0.5 mm og diameter 10 cm. En isopropanolvasket plastfilm plasseres oppå pressformene før de blir lagt inn i en forhåndsoppvarmet presse for pressing.

Tabell 3 – Kryssbinding av flate prøver.

| Prosess | Trykk[tonn] | Temperatur[°C] | Tid[min] |
|------------|-------------|----------------|----------|
| Forvarming | 3,5 | 118 | 10 |
| Pressing | 25 | 170 | 40 |
| Kjøling | 25 | av | 10 |

3.1.4 Kondisjonering

Etter kryssbinding av polyetylen og halvleder blir prøvene kondisjonert for å redusere mengde restprodukter fra kryssbindingen i prøven. Kondisjonering

av prøvene gjennomføres ved å legge de i varmeskap med temperatur på 90°C i 72 timer. Dette gjøres ved normalt atmosfærisk trykk.

3.1.5 Måling av tykkelse på flate prøver

Når prøvene er kondisjonert har de en diameter på 10 cm. For å få plass i både ionesputter og målecelle i PEA-oppsettet brukes stansekniv på prøvene for å redusere diameteren fra 10 cm til 6 cm. Avkappet etter bruk av stansekniv snittes opp og legges i mikroskop. I mikroskop blir randtykkelsen på PEX laget i prøven målt. Den målte randtykkelsen brukes som estimat for antatt tykkelse av PEX i området av prøven hvor DC-spenningen blir påtrykt under måling av romladninger.

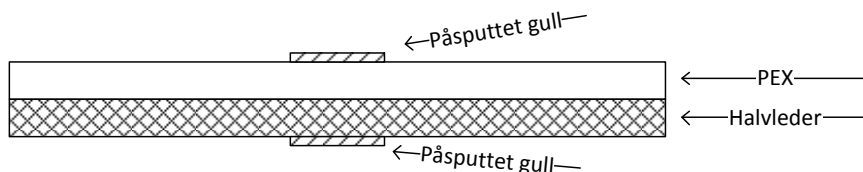
Når det er gjennomført måleserie på prøvene snittes den opp i området hvor DC-spenningen har vært påtrykt påtrykt. Reell tykkelse i området blir målt med mikroskop og sammenlignet med estimat for antatt tykkelse.

3.1.6 Ionesputting av gull

Ionesputting av gull gjøres ved hjelp av ionesputter. Sputting er en prosess hvor atomer slynges ut fra et solid materiale ved å bombardere materialet med høyenergitiske partikler. Materialet er i dette tilfellet gull. Gullet er ment å gjøre kontaktflaten mellom eksterne elektroder i PEA-oppsettet og prøven optimale da de små gullpartiklene er ment å fylle ut eventuelle ugjevnheter på prøveoverflaten. Dette resulterer i at størst mulig kontaktflate mellom prøve og eksterne elektroder oppnås.

Sputting av gull på prøvene gjøres i 15 minutter på hver side. Strømstyrken dette gjøres med er 3 mA og spenning opp til 1 kV DC. Hvis det ikke er tilstrekkelig med 1 kV for å oppnå 3 mA justeres vakuomet på ionesputtermaskinen til rett strømstyrke oppnås. Det påsputtete gullet har en diameter på 2 cm og plasseres midt på prøven.

De ferdigsputtete prøvene er klare for bruk i PEA-målesystemet for flate prøver. Se figur 7 for skisse av den derfigsputtete prøven.



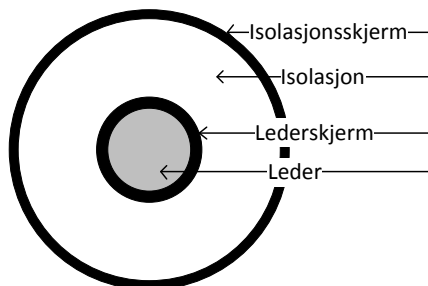
Figur 7 – Skissert tverrsnitt av kryssbundet gullsputtet flat prøve. Tykkelsen på gullagene i figuren er skalert opp for illustrasjon og vil i virkeligheten være betydelig tynnere.

3.2 Tilberedning av miniatyrkabel

Miniatyrkabelen kommer ferdig ekstrudert, kryssbundet og kondisjonert fra leverandør. Tykkelsen på kabelens bestanddeler og lagdelingen av kabelsammensetningen er som i tabell 4 og figur 8.

Tabell 4 – Kabeloversikt

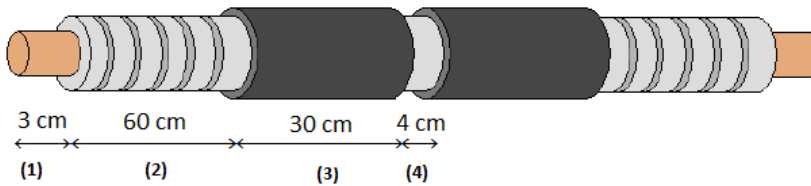
| Komponent | beskrivelse | Tykkelse[mm] |
|------------------|---|-----------------|
| Leder | Solid kopperleder (1.5mm ²) | 1.38 (diameter) |
| Lederskjerm | Ekstrudert halvleder materiale av PEX, LE0595 | 0.46 |
| Isolasjon | PEX, LS4201S | 1.75 |
| Isolasjonsskjerm | Ekstrudert halvleder materiale av PEX, LE0595 | 0.15 |
| Miniatyrkabel | Ytre mål | 6.1 (diameter) |



Figur 8 – Tverrsnitt av miniatyrkabel.

Lengden på miniatyrkabel som brukes under romladningsmåling i kabeloppsettet er 190 cm. Ved bruk av skrellemaskin blir ytre halvleder ned til polyetylenen fjernet på kabelen. Dette gjøres på område (2) og (4) i figur 9. På område (1) blir polyetylenen fjernet ned til kobberleder. Dette gjøres med tang.

Videre blir elektrisk stresskontroll tape strimlet opp i ca 5 mm brede sammenhengende lengder. Disse strimlene blir viklet på miniatyrkabelen på område (2). Tapen er viklet i et lag, med ca 3-4 mm mellomrom mellom hver vinding. Når viklingen er gjennomført er miniatyrkabel klar til bruk i kabeloppsettet.



Figur 9 – Tilberedt miniatyrkabel klar for montering. Område (1) er avisolert leder, område (2) og (4) er blottlagt polyetylen hvor område (2) i tillegg er påkledd stresskontroll tape. Område (3) er ubehandlet miniatyrkabel[11].

3.3 Oppsett for romladningsmåling

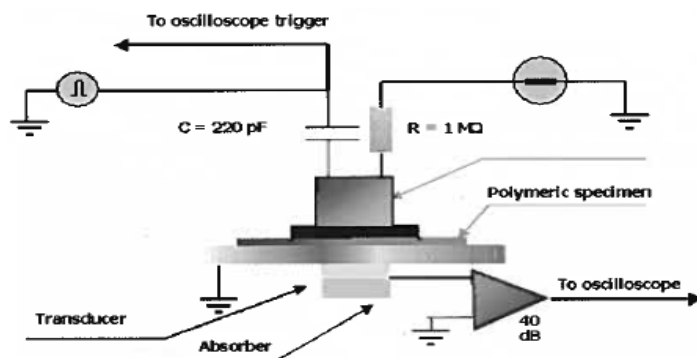
Målemetoden som detekterer romladninger i miniatyrkabel og flate prøver baserer seg på PEA-målemetode, se kapittel 2.6. Sensitivitetsgrensen for måleutstyret er $0.1 C/m^3$. Måleoppsett for flate prøver og miniatyrkabel logger til en datamaskin. Etter algoritmisk databehandling blir de endelige måleresultatene presentert ved bruk av Matlab.

3.3.1 Måling på flate prøver

Det eksperimentelle oppsettet brukt i forbindelse med måling av romladninger i flate prøver er vist i figur 10.

Målecellen er plassert i et Faradays bur. Målecellen, som inneholder både piezoelektrisk måleenhet og pulsgenerator blir rengjort med isopropanol. Puls-generatoren genererer en puls på 0-500 V med en pulslengde på 10 ns[15]. Elektrodene består av aluminium(katode) og halvleder(anode) som er påfulgt med en massiv kobberleder. Det blir påført en tynn film med silikonolje mellom katode og prøve, mellom kobberleder og halvleder(anode) og mellom halvleder og prøve. Silikonoljen forbedrer den akustiske kontakten. Prøven plasseres i målecellen med halvleder mot katode. Anoden blir skrudd sammen med katoden ved bruk av en momentnøkkel. Påtrykt momentet er 25 N. Prøven står serielt med en DC spenningskilde i målecellen. DC kilden leverer 0-70 kV. Målecellen kobles til et oscilloskop og en datamaskin.

Prøven kalibreres med $\pm 1-15$ kV/mm. Ønsket gjennomsnittlig elektrisk feltstyrke som prøven skal utsettes for over tid stilles inn ut fra estimert tykkelse på prøven, beregnet med ligning (2.6). Tidspunktene for romladningsmåling stilles inn i programvaren hvor måleutstyret styres fra. Målingene utføres automatisk. Se figur 37 i vedlegg A for måletidspunkt på flate prøver. For hvert måletidspunkt er det 10 målinger med DC-spenning på og 20 målinger DC-spenning av. Det brukes en pulsspenningen er 500 V i samtlige måleserier.



Figur 10 – PEA målesystem for detektering av romladninger i flate prøver[15].

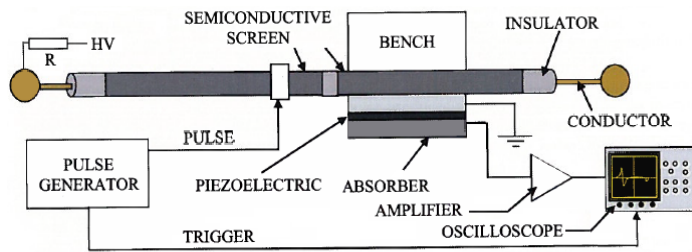
Når måleserien er ferdigkjørt snittes området hvor elektrodene har vært trykt mot prøven opp og den reelle tykkelsen av prøven i elektrodeområdet blir målt. Denne tykkelsen sammenlignes med estimert tykkelse av prøve, beregnet ut fra forklaring i kapittel 3.1.5.

3.3.2 Måling på miniatyrkabel

Det eksperimentelle oppsettet brukt i forbindelse med måling av romladninger i miniatyrkabel er vist i figur 11.

Miniatyrkabelen plasseres i et Faradays bur, hvor både pulsgenerator og piezoelektrisk måleenhet er montert. Pulsgenerator og piezoelektrisk måleenhet monteres på område 3 i figur 9, en på hver side av område 4. Den piezoelektriske måleenheten rengjøres med isopropanol, og påføres en tynn silikonoljefilm i kontaktområde med miniatyrkabel. Både piezoelektrisk måleenhet og pulsgenerator har en skrume mekanisme som setter miniatyrkabel i klem og sørger for god kontakt mellom de. Miniatyrkabelen monteres i serie med DC-kilde og en motstand. Motstanden har resistivitet 50 MΩ. Endeavslutningene til miniatyrkabel har påmontert coronaringer for å begrense feltgradienten. DC-kilden brukt i dette oppsettet har spenningsnivå 0-50 kV. Den piezoelektriske måleenheten er koblet til et oscilloskop, som er koblet til en datamaskin. Pulsgeneratoren kan levere 0-5000 V[14]. Pulsbredden er 40ns med en frekvens på 150Hz.

Miniatyrkabel kalibreres med $\pm 0-15$ kV/mm. Både kalibrering og ønsket påtrykt elektrisk feltstyrke som miniatyrkabel utsettes for over tid stilles inn ut fra ligning (2.6). Tidspunktene for romladningsmåling stilles inn i programvaren hvor måleutstyret styres fra. Se figur 37 i vedlegg A for måletidspunkter brukt under måling. Målingene utføres automatisk. For hvert måletidspunkt er det 10 målinger med DC-spenning på og 20 målinger DC-spenning av. Det brukes en pulsspenning på 5 kV i samtlige måleserier.



Figur 11 – PEA målesystem for detektering av romladninger i miniatyrkabel[14].

4 Resultat

Figurene som presenteres er plottet rådata (tidsavhengige spenningsplott), plott av romladningsakkumulasjon (avhengig av prøvetykkelse) og plott av feltforsterkning (avhengig av prøvetykkelse). Plottet rådata er både ubehandlet og glattet. Glattet rådataplott viser den gjennomsnittlige rådatakurven. Plott av romladning og feltforsterkning er prosessert gjennom algoritmer som forklart i kapittel 2.6. Det presenteres måleresultat gjort med kontinuerlig DC-spenning på (Von) og av (Voff).

Vertikale markørstreker i figurer som viser plott av måleresultater representerer elektrodene. Venstre markørstrek er katode og høyre markørstrek er anode. Polariteten til elektrodene er markert med $-$ og $+$ tegn. Polariteten til HVDC-kildene, spenningsatt Von- og spenningsløs Voff-målinger er verifisert ved bruk av probe.

Materialrespons oppnås når påtrykt elektrisk feltstyrke er høy nok under kalibrering til at elektrodene er synlige i plott av rådata og påfølgende gir en synlig elektroderespons.

4.1 Miniaturkabel

Tabell 5 viser oversikt over måleserier gjennomført på miniaturkabel. Måleseriene ble gjennomført med likt måleoppsett, som er beskrevet i kapittel 3.3.2.

4.1.1 Måleserie #K1 - 20 kV/mm

Kalibrering

Kalibreringen av måleserie #K1 ble gjort med negativ og positiv DC-spenning fra 0 til 15 kV/mm. Kalibrering gjort med 0 - 10 kV/mm ga ingen respons i

Tabell 5 – Oversikt over måleserier gjennomført på miniaturkabel. Miniaturkabelens bestanddeler er beskrevet i tabell 4 og figur 8. Gjennomsnittlig elektrisk feltstyrke ble beregnet med ligning (2.6) og radielle felstyrker med ligning (2.7).

| Måleserie | #K1 | #K2 |
|---|------|------|
| Gjennomsnittlig elektrisk felstyrke [kV/mm] | 20 | 25 |
| Radiell felstyrke ved r_{indre} [kV/mm] | 32.9 | 41.1 |
| Radiell felstyrke ved r_{ytte} [kV/mm] | 13.1 | 16.3 |
| Tidsrom [dager] | 40 | 26 |

materialet. Materialrespons kom først ved 15 kV/mm, se figur 12. I figuren sees det oscillering i isolasjonen nært katoden og i bulk. Avstanden fra katoden inn til oscilleringene er beregnet med ligning (2.10). Amplitudeverdiene på spenningen ved elektrodene er \pm 3-4 mV.

Rådata - spenning av og på

Figur 13 viser rådata som transduser mottar etter at måleserien har vært spenningssatt i 40 min. Plottet viser en differanse i amplituder med spenning på og av og oscillasjoner i bulk av prøven. Plottet er markert med amplitudedifferanser og avstanden mellom oscillasjonene.

Utvikling i rådata over tid med spenning av - 10 min til 2.5 timer

Figur 14 viser utviklingen i rådata som måles de første 2.5 timer etter oppstart av måleserien. Plottet viser uglattet rådata og glattet rådata som tidsavhengige spenningssignal. Det observeres rask amplitudevekst i grensesjikt elektroder-isolasjon og i isolasjon nært katoden. Veksten avtar etter 40 min. Fra 40 min frem til 2.5 timer er det lite amplitudevekst. Oscillering i bulk av prøven er tilstede igjennom hele måleserien og er synlig fra første måling gjort etter 10 min. Det observeres ingen amplitudevekst i oscillasjoner over tid lengre inn i isolasjonen. Se figur 38 i vedlegg A for plott av rådata i tidsrommet 2.5 timer til 40 dager.

Felt- og romladningsutvikling - 10 min til 2.5 timer

Figur 15 viser utvikling i romladningsakkumulasjon og feltforsterkning for de første 2.5 timene.

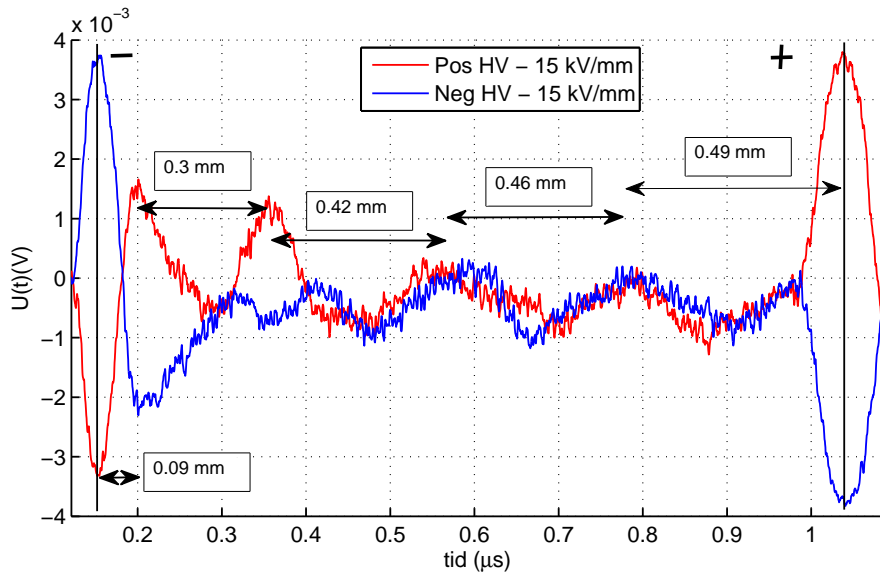
Romladningsakkumulasjonens utvikling over tid har en tydelig formlikhet med utvikling i rådata, se figur 14. Det observeres økt akkumulasjon av homoladninger i grensesjikt elektroder-isolasjon, samt en økende akkumulasjon av heteroladninger i materialet nært elektrodene frem til 40 min. Oscilleringer som er observert i råsignalet er tilstede i akkumulasjonsplottet.

Feltforsterkningen øker med tid frem til 40 min. Feltforsterkningen viser mer forsterkning ved anoden enn ved katoden.

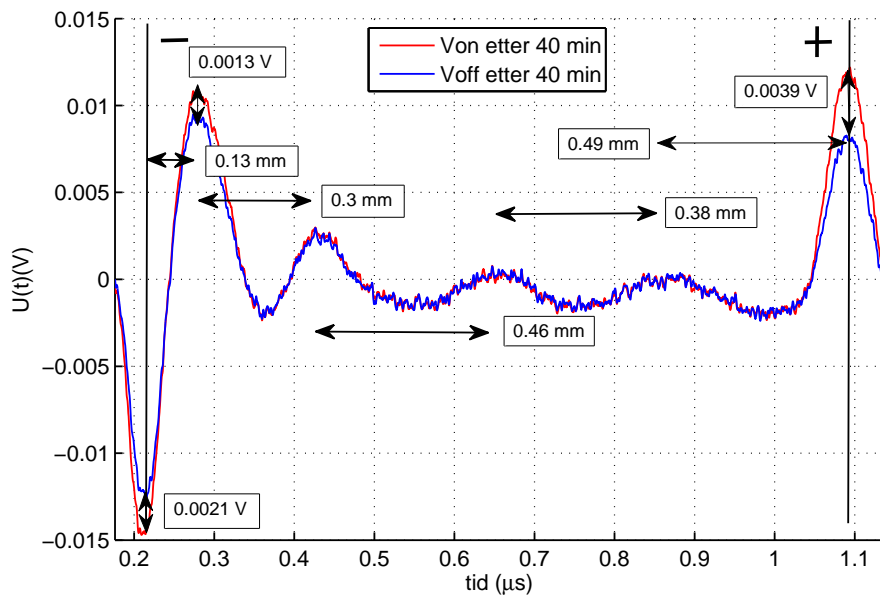
Felt- og romladningsutvikling - 2.5 timer til 40 dager

Figur 16 viser liten utvikling i romladningsakkumulasjonen i tidsrommet 2.5 timer frem til 40 dager. Det er små oscilleringer i akkumulasjonen ved grensesjikt elektroder-isolasjon og i isolasjonen nært elektrodene. Disse oscillasjonene gjenspeiles i feltforsterkningen. Noen av oscilleringene er under sensitivitetsgrensen til måleutstyret. Den fraværende utviklingen i akkumulert romladning fra 40 min frem til 40 dager gjenspeiles fra utviklingen i rådata for tidsrommet 40 min til 40 dager.

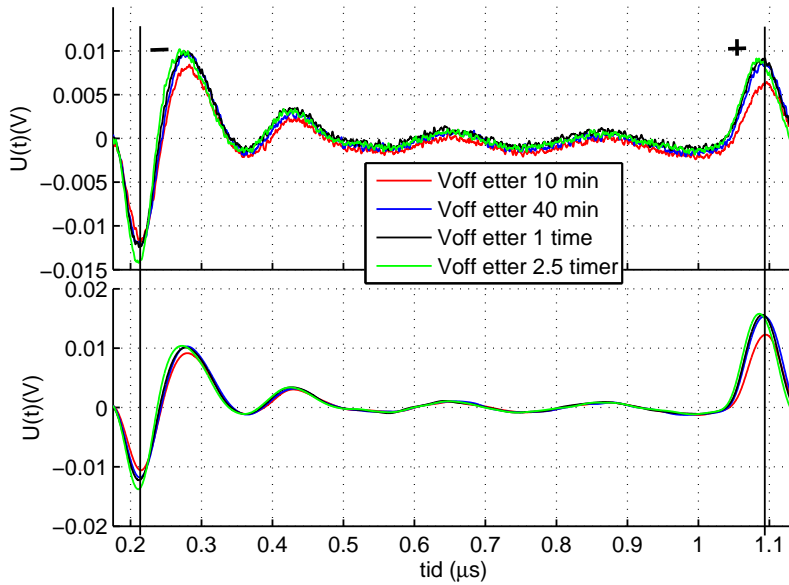
Feltforsterkningen viser mer forsterkning ved anoden enn ved katoden.



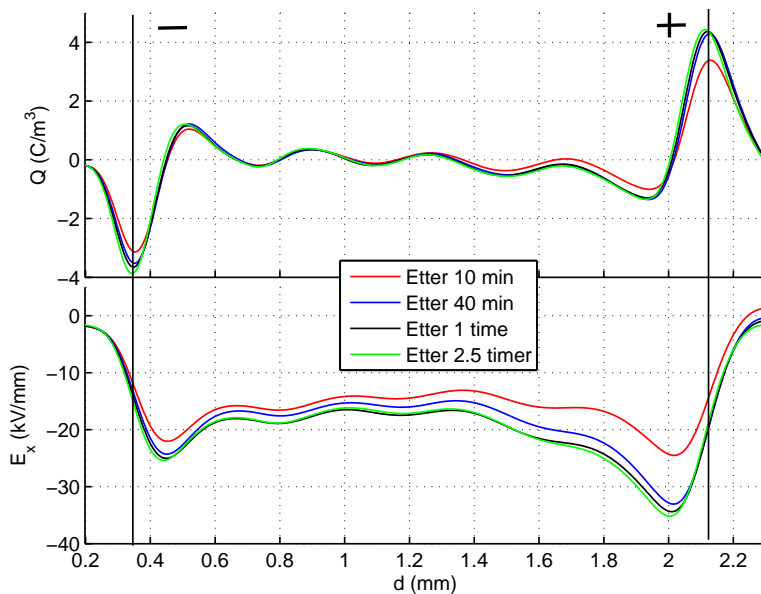
Figur 12 – Kalibreringsrespons for måleserie #K1.



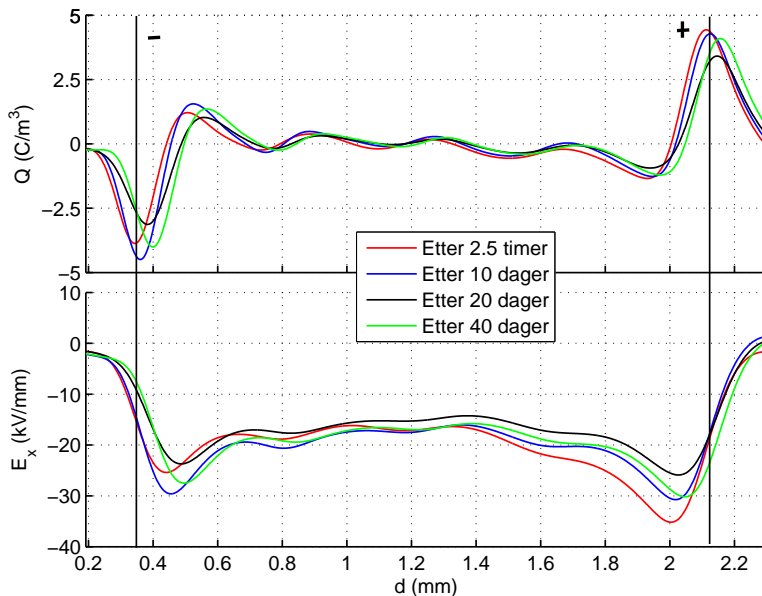
Figur 13 – Plott av rådata med spenning av og på etter 40 min for måleserie #K1.



Figur 14 – Plott av rådata med spenning av, før(over) og etter(under) utglating for måleserie #K1 - 10 min til 2.5 timer.



Figur 15 – Felt- og romladningsutvikling for måleserie #K1 - 10 min til 2.5 timer.



Figur 16 – Felt- og romladningsutvikling for måleserie #K1 - 2.5 timer til 40 dager.

4.1.2 Måleserie #K2 - 25kV/mm

Kalibrering

Kalibreringen av måleserie #K2 ble gjort med negativ og positiv DC-spenning fra 0 til 15 kV/mm. Kalibrering gjort med 0 - 10 kV/mm ga ingen respons i materialet. Materialrespons kom først ved 15 kV/mm, se figur 17.

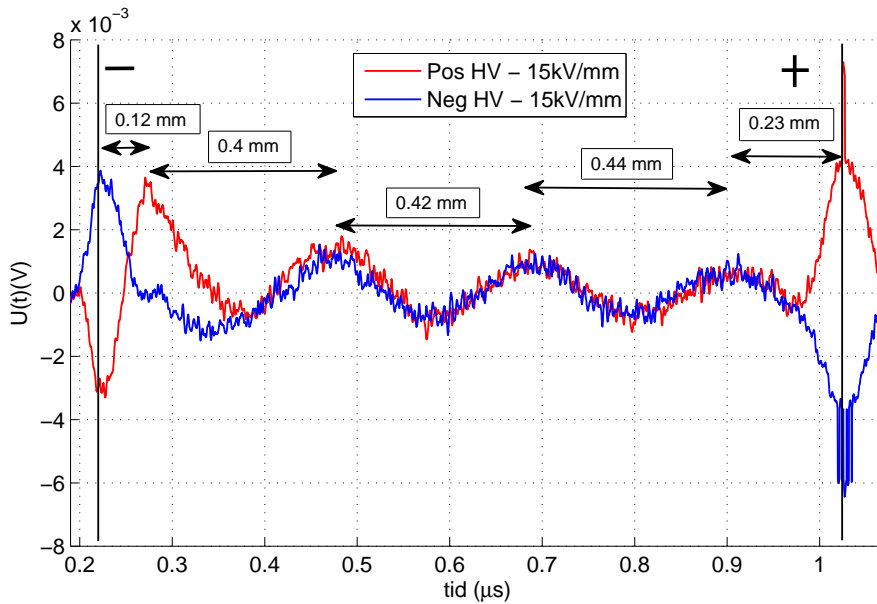
I figuren sees det oscillering i isolasjonen nært katoden og i bulk. Avstanden fra katoden inn til oscilleringene er beregnet med ligning (2.10). Amplitudeverdiene på spenningen ved elektrodene gjør et sprang ved anode. Sprangamplituden er ± 7 mV. Midlere amplitudeverdi for begge elektrodene er $\pm 3-4$ mV.

Rådata - spenning av og på

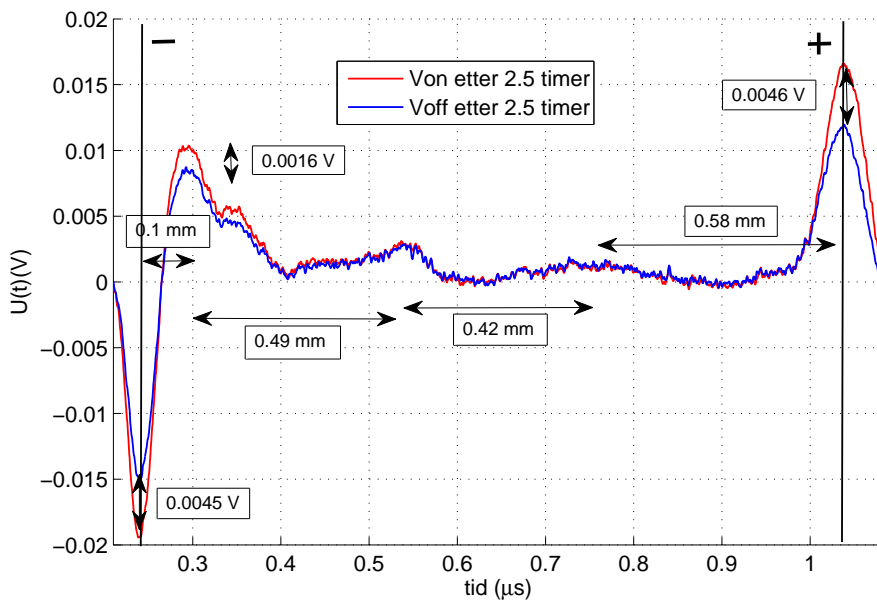
Figur 18 viser rådata som transduser mottar etter at måleserien har vært spenningsatt i 2.5 timer. Plottet viser en differanse i amplituder med spenning på og av og noe oscillasjoner i bulk av prøven. Figuren er merket med amplitudedifferanser og avstanden mellom oscillasjonene.

Utvikling i rådata over tid med spenning av - 10 min til 2.5 timer

Figur 19 viser utviklingen i rådata som måles de første 2.5 timer etter oppstart av måleserien. Plottet viser uglattet rådata og glattet rådata som tids-



Figur 17 – Kalibreringsrespons for måleserie #K2.



Figur 18 – Plott av rådata med spenning av og på etter 2.5 min for måleserie #K2.

avhengige spenningsignal. Det observeres rask amplitudevekst i grensesjikt elektroder-isolasjon og i isolasjon nært katoden. Veksten avtar etter 40 min. Etter 40 min og frem til 2.5 timer er det lite amplitudevekst. Noe oscillerer i bulk av prøven er tilstede gjennom hele måleserien. Se figur 39 i vedlegg A for utvikling i rådata i tidsrommet 2.5 timer til 26 dager.

Felt- og romladningsutvikling - 10 min til 2.5 timer

Figur 20 viser utvikling i romladningsakkumulasjon og feltforsterkning for de første 2.5 timene.

Romladningsakkumulasjonens utvikling har noe formlikhet med utvikling i rådata, se i figur 19. Det observeres økt akkumulasjon av homoladninger i grensesjikt elektroder-isolasjon frem til 40 min. Det er lite romladningsakkumulasjon i bulk. Ikke alle oscilleringer som er observert i råsignalet er tilstede i akkumulasjonsplottet.

Feltforsterkningen øker med tid frem til 40 min. Feltforsterkningen viser mer forsterkning ved anoden enn ved katoden.

Felt- og romladningsutvikling - 2.5 timer til 26 dager

Figur 21 viser liten utvikling i romladningsakkumulasjonen i tidsrommet 2.5 timer frem til 26 dager. Det er små oscilleringer i akkumulasjonen ved grensesjikt elektroder-isolasjon. Noen av oscilleringene er under sensitivitetsgrensen til måleutstyret.

Feltforsterkningen viser mer forsterkning ved anoden enn ved katoden.

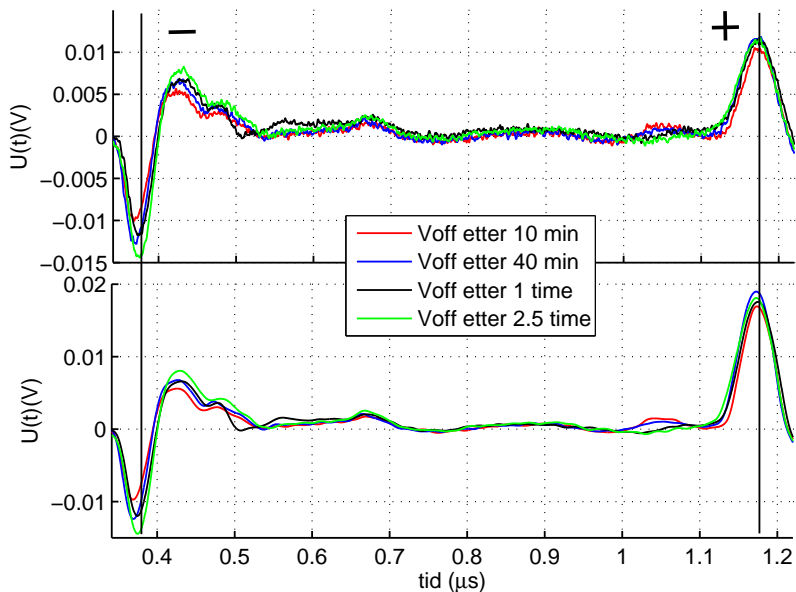


Figure 19 – Plott av rådata med spenning av, før(over) og etter utglatting(under) for måleserie #K2 - 10 min til 2.5 timer.

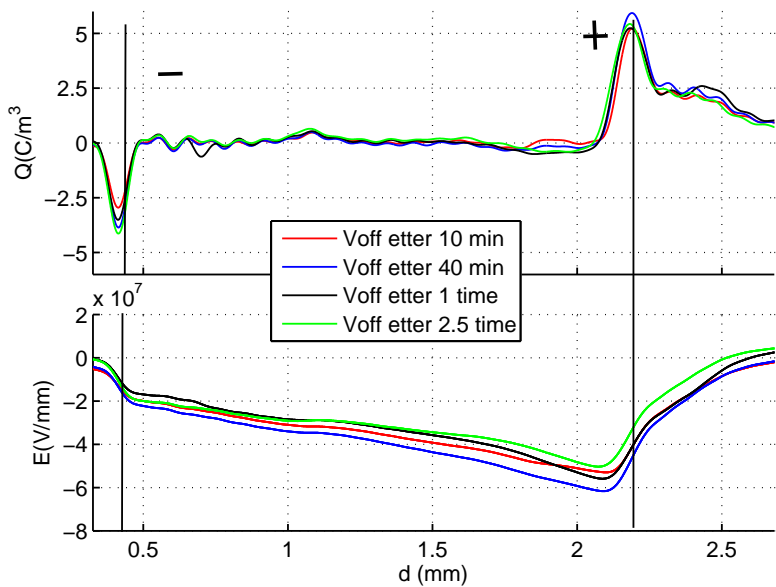
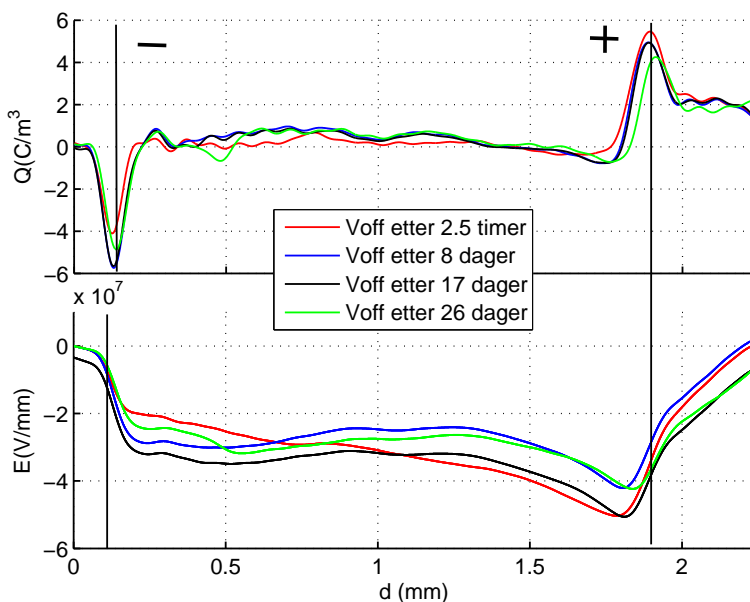


Figure 20 – Felt- og romladningsutvikling for måleserie #K2 - 10 min til 2.5 timer.



Figur 21 – Felt- og romladningsutvikling for måleserie #K2 - 2.5 timer til 26 dager.

4.2 Flate prøver

Tabell 6 viser oversikt over måleserier gjennomført på flate prøver. Måleseriene ble gjennomført med likt måleoppsett, som beskrevet i kapittel 3.3.1.

4.2.1 Måleserie #F1 - 15 kV/mm

Kalibrering

Kalibreringen av måleserie #F1 ble gjort med negativ og positiv DC-spenning

Tabell 6 – Oversikt over måleserier gjennomført på flate prøver. Elektriske feltstyrker ble beregnet med ligning (2.6). Estimert og målt tykkelse ble beregnet som i kapittel 3.1.5

| Måleserie | #F1 | #F2 | #F3 |
|-----------------------------|------|------|------|
| Elektrisk felstyrke [kV/mm] | 15 | 20 | 25 |
| Tidsrom [dager] | 21 | 16 | 18 |
| Estimert randtykkelse [mm] | 0.26 | 0.20 | 0.22 |
| Målt tykkelse [mm] | 0.26 | 0.20 | 0.22 |

fra 0 til 12.5 kV/mm. Kalibrering gjort med 0-10 kV/mm ga ingen respons i materialet. Materialrespons kom først ved 12.5 kV/mm, se figur 22. Amplitudeverdiene på spenningen ved elektrodene er ± 1.75 mV. Maks Bredde på amplitudene er 0.045 μ s.

Rådata - spenning av og på

Figur 23 viser rådata som transduser mottar etter at måleserien har vært spenningssatt i 13 dager. Plottet viser rådata med spenning på og av. Amplitudedifferansene er markert i plottet.

Utvikling i rådata over tid med spenning av - fra 5 min til 2 dager

Figur 24 viser utviklingen i rådata som måles de første 2 dager etter oppstart av måleserien. Plottet viser uglattet rådata og glattet rådata som tidsavhengige spenningssignal. Se figur 40 i vedlegg A for plott av rådata for tidsrommet 2 dager til 21 dager.

Felt- og romladningsutvikling - 5 min til 2 dager

Fra start av måleserien er det en økende homoakkumulasjon ved grensesjikt katode-isolasjon, se figur 25. Denne når maks amplitudeverdi etter 12 timer. Etter 12 timer frem til 2 dager er amplitudeverdien oscillerende. Ved dag 2 begynner homoakkumulasjon å få redusert maks amplitudeverdi.

Etter 40 min akkumuleres det heteroladninger i isolasjonen nært katoden. Denne akkumulasjonen flytter seg inn mot bulk i isolasjonen etter 2 dager. Ved grensesjikt anode-isolasjon når maks homoakkumulasjon etter 5 min. Denne verdien er tilnærmet konstant frem til 2 dager, med noe oscillasjon. Det er en økende feltforsterkning fra start av måleserien frem til 2 dager med oscillasjon. Feltforsterkningen er størst nært katoden.

Felt- og romladningsutvikling - 2 dager til 21 dager

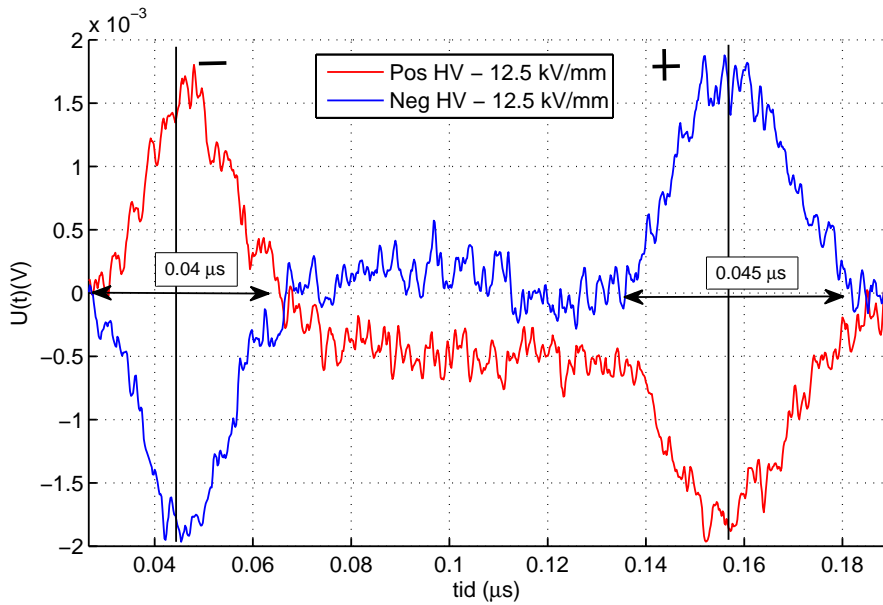
Fra 2 dager til 3 dager halveres amplituden ved grensesjikt katode-isolasjon, se figur 26. Tilsynelatende katode flytter seg gradvis inn mot bulk av prøven frem til 6 dager. Frem til 21 dager er tilsynelatende katode konstant, med oscillasjon.

Fra 2 dager til 21 dager dannes det gradvis en ny 'elektrode' ved katode. Denne har amplitudeverdi over sensitivitetsgrensen og har hetero akkumulasjon.

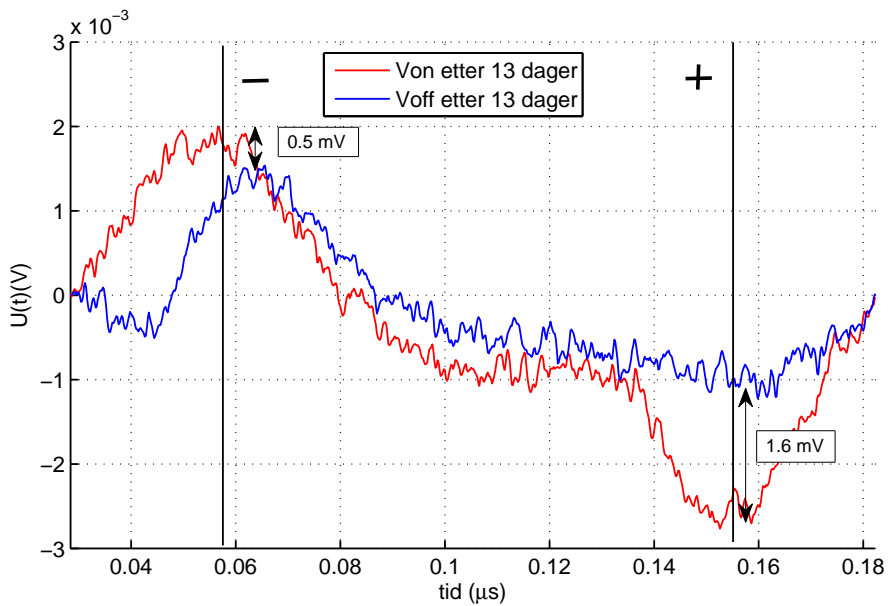
I bulk av prøven er det fra 2 dager til 21 dager oscillering i akkumulert romladning både over og under sensitivitetsgrensen.

Ved anoden vokser amplituden gradvis med oscillering frem til 21 dager.

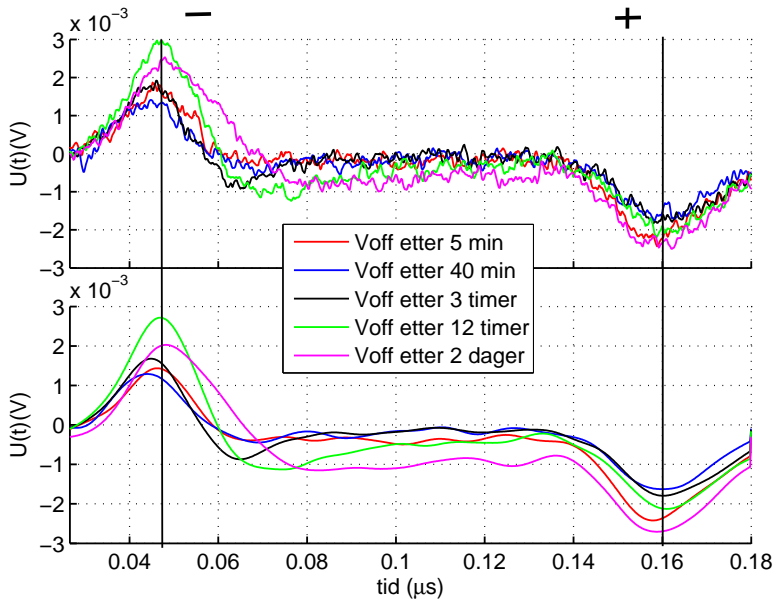
Det er oscillerende økende feltforetserkning etter 21 dager. Feltforsterkningen er størst i prøven nært katode.



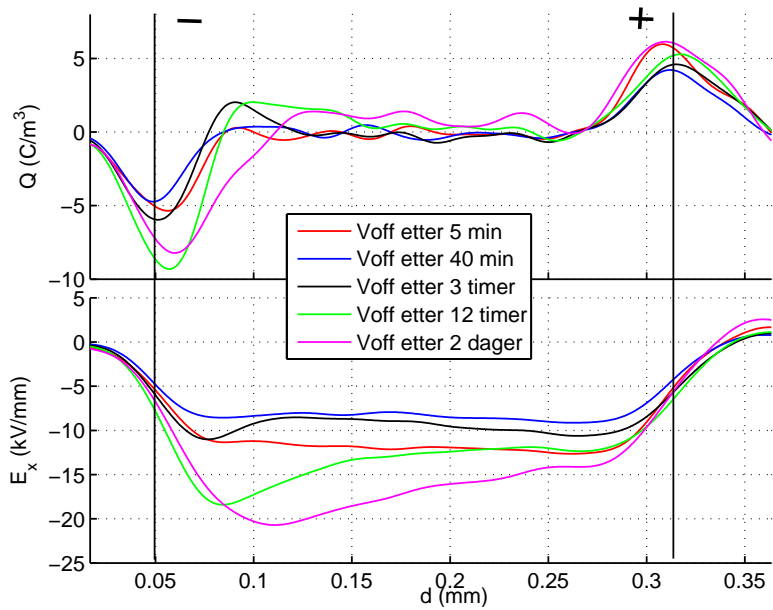
Figur 22 – Kalibreringsrespons for måleserie #F1.



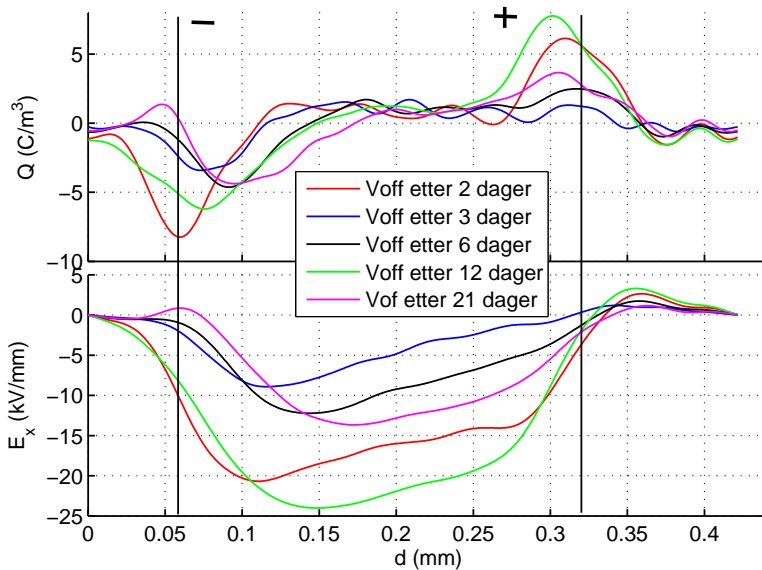
Figur 23 – Plott av rådata med spenning på og av etter 13 dager for måleserie #F1.



Figur 24 – Plott av rådata med spenning av, før(over) og etter(under) utglatting for måleserie #F1 - 5 min til 2 dager.



Figur 25 – Felt- og romladningsutvikling for måleserie #F1 - 5 min til 2 dager.



Figur 26 – Felt- og romladningsutvikling for måleserie #F1 - 2 dager til 21 dager.

4.2.2 Måleserie #F2 - 20 kV/mm

Kalibrering

Kalibreringen av måleserie #F2 ble gjort med negativ og positiv DC-spenning fra 0 til 12.5 kV/mm. Kalibrering gjort med 0-10 kV/mm ga ingen respons i materialet. Materialrespons kom først ved 12.5 kV/mm, se figur 27. Amplitudeverdiene på spenningen ved elektrodene er ± 1.75 -2.25 mV. Maks Bredder på amplitudene er 0.05 μ s.

Rådata - spenning av og på

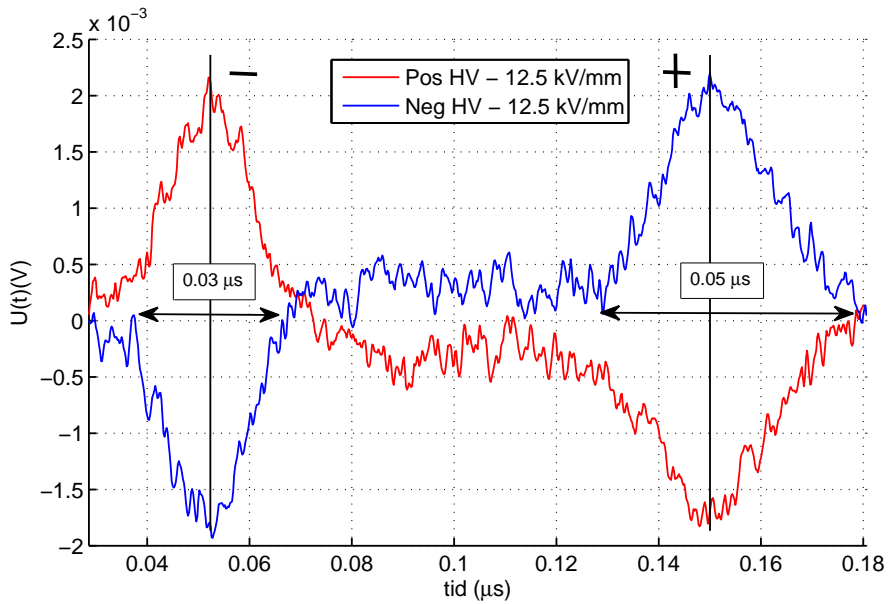
Figur 28 viser rådata som transduser mottar etter at måleserien har vært spenningsatt i 13 dager. Plottet viser rådata med spenning på og spenning av. Amplitudedifferanse er markert i plottet.

Utvikling i rådata over tid med spenning av - fra 5 min til 2 dager

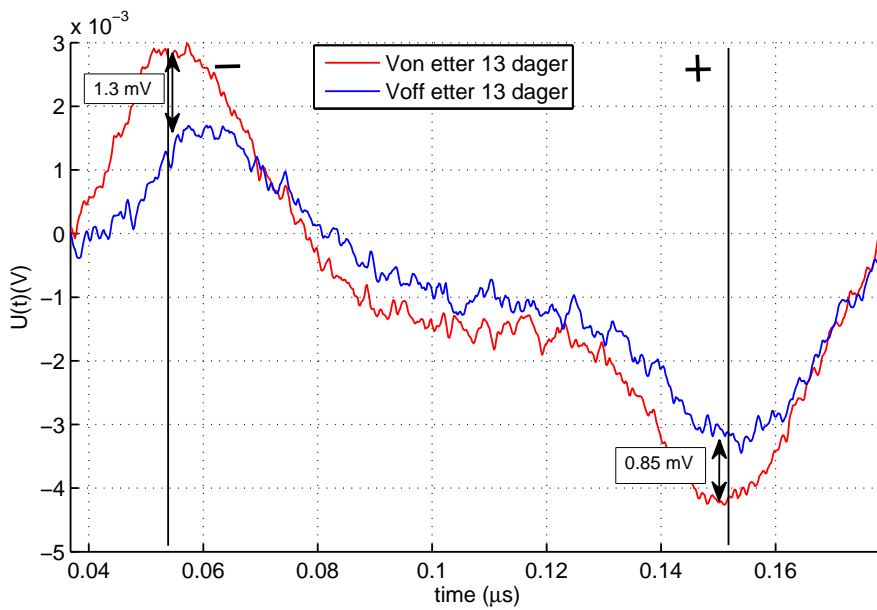
Figur 29 viser utviklingen i råsignalet som måles de første 2 dager etter at måleserien er startet. Plottet viser uglattet rådata og glattet rådata som tidsavhengige spenningsignal. Se figur 41 i vedlegg A for råsignal i tidsrommet 2 dager til 16 dager.

Felt- og romladningsutvikling - 5 min til 2 dager

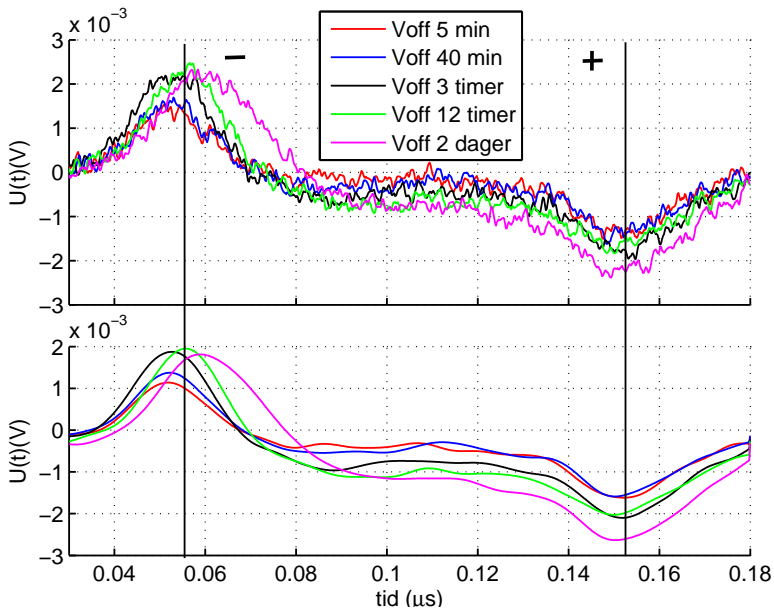
Fra start av måleserien er det en økende homoakkumulasjon ved grensesjikt katode-isolasjon, se figur 30. Denne når maks amplitudeverdi etter 12 timer.



Figur 27 – Kalibreringsrespons for måleserie #F2.



Figur 28 – Plott av rådata med spenning av og på etter 13 dager for måleserie #F2.



Figur 29 – Plott av rådata med spenning av, før(over) og etter(under) utglating for måleserie #F2 - 5 min til 2 dager.

Etter 12 timer frem til 2 dager er amplitudeverdien i grensesjiktet oscillerende og begynner å bevege seg inn mot senter av bulk.

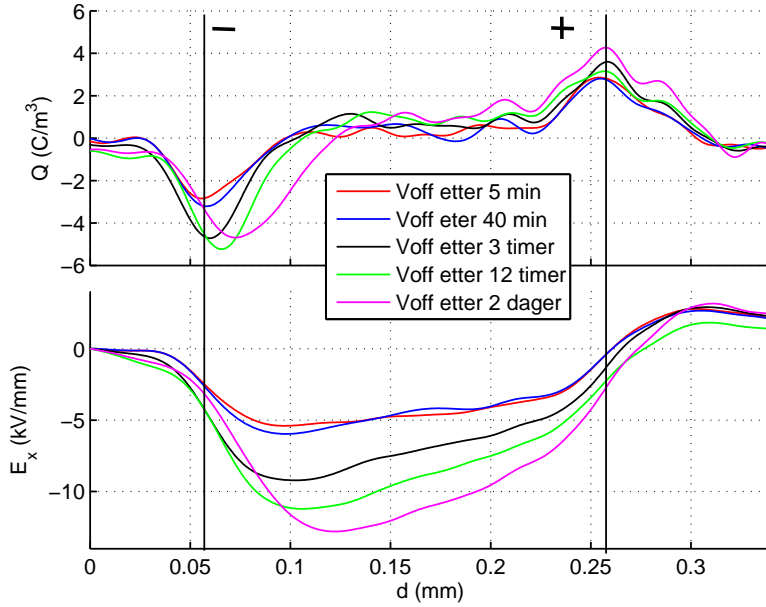
Etter 3 timer er det en begynnende akkumulasjon av heteroladninger i bulk. Denne akkumulasjonen er over sensitivitetsgrensen til måleutstyret. Akkumulasjonen flytter seg mot anode fra katode fra 3 timer og frem til 2 dager. Ved grensesjikt anode-isolasjon er det fra 5 min til 2 dager en økende homoakkumulasjon, med noe oscillering.

Der er en økende feltforsterkning fra start av måleserien frem til 2 dager. Det er lite oscillering i økningen. Feltforsterkningen er størst nær katoden.

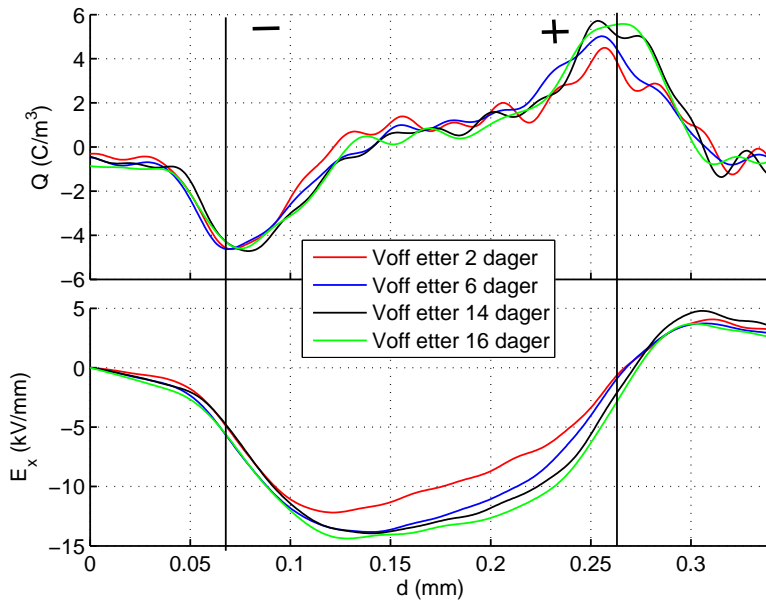
Felt- og romladningsutvikling - 2 dager til 21 dager

Fra 2 dager til 16 dager er det ingen utvikling i amplituden ved grensesjikt katode-isolasjon, se figur 31. Akkumulasjonen av heteroladninger i bulk holder seg tilsynelatende stabil i perioden 2 dager til 16 dager. Amplitudeverdien ved grensesjikt anode-isolasjon har litt vekst i perioden 2 dager til 16 dager.

Feltforsterkningen øker minimalt fra 2 dager til 6 dager. Fra 6 dager til 16 dager er det ingen vekst i feltforsterkningen. Feltforsterkningen er sterkest ved katoden.



Figur 30 – Felt- og romladningsutvikling for måleserie #F2 - 5 min til 2 dager.



Figur 31 – Felt- og romladningsutvikling for måleserie #F2 - 2 dager til 16 dager.

4.2.3 Måleserie #F3 - 25 kV/mm

Kalibrering

Kalibreringen av måleserie #F3 ble gjort med negativ og positiv DC-spenning fra 0 til 10 kV/mm. Kalibrering gjort med 0-10 kV/mm ga ingen respons i materialet. Materialrespons kom ved 10 kV/mm, se figur 32. Amplitudeverdiene på spenningen ved elektrodene ligger på $\pm 1-1.25$ mV. Maks Bredde på amplitudene er $0.04 \mu\text{s}$.

Rådata - spenning av og på

Figur 33 viser råsignalet som transduser mottar etter at måleserien har vært spenningsatt i 13 dager. Plottet viser råsignal med spenning på og av. Amplitudedifferansen er markert i plottet.

Utvikling i rådata over tid med spenning av - fra 5 min til 2 dager

Figur 34 viser utviklingen i råsignalet som måles de første 2 dager etter at måleserien er startet. Plottet viser uglattet rådata og glattet rådata som tidsavhengige spenningsignal. Se figur 42 i vedlegg A for råsignal i tidsrommet 2 dager til 16 dager.

Felt- og romladningsutvikling - 5 min til 2 dager

Fra start av måleserien er det en høy homoakkumulasjon ved grensesjikt katode-isolasjon, se figur 35. Amplituden til akkumulasjonen ved 5 og 40 min er like høy. Amplituden i grensesjiktet er størst etter 3 timer.

Fra 40 min akkumuleres det heteroladninger i isolasjonen nært katoden. Denne akkumulasjonen flytter seg inn mot bulk i isolasjonen frem til 2 dager.

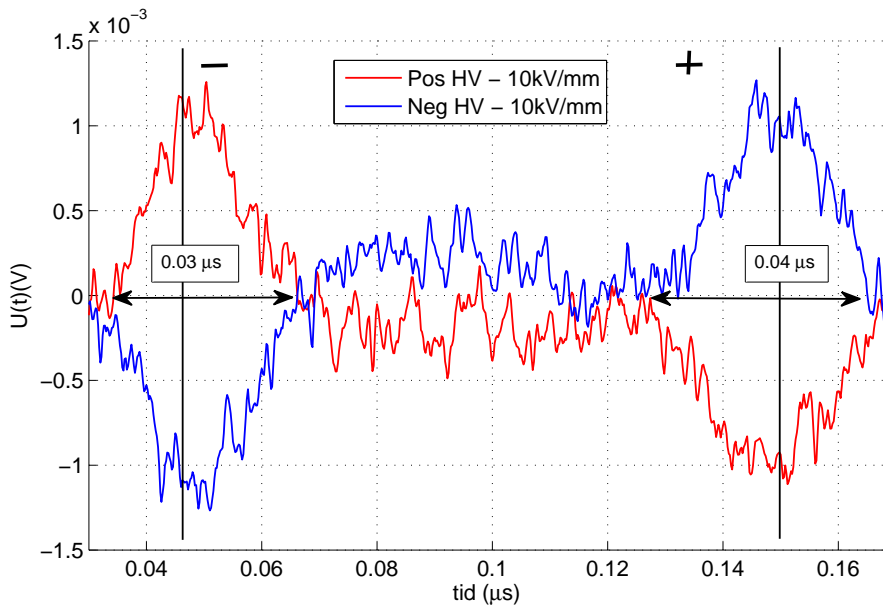
Ved grensesjikt anode-isolasjon nås maks amplitudeverdi etter 5 min og reduseres frem mot 40 min. Grensesjiktet anode-isolasjon ser ut til å bevege seg inn mot bulk fra 3 timer frem mot 2 dager.

Felt- og romladningsutvikling - 2 dager til 18 dager

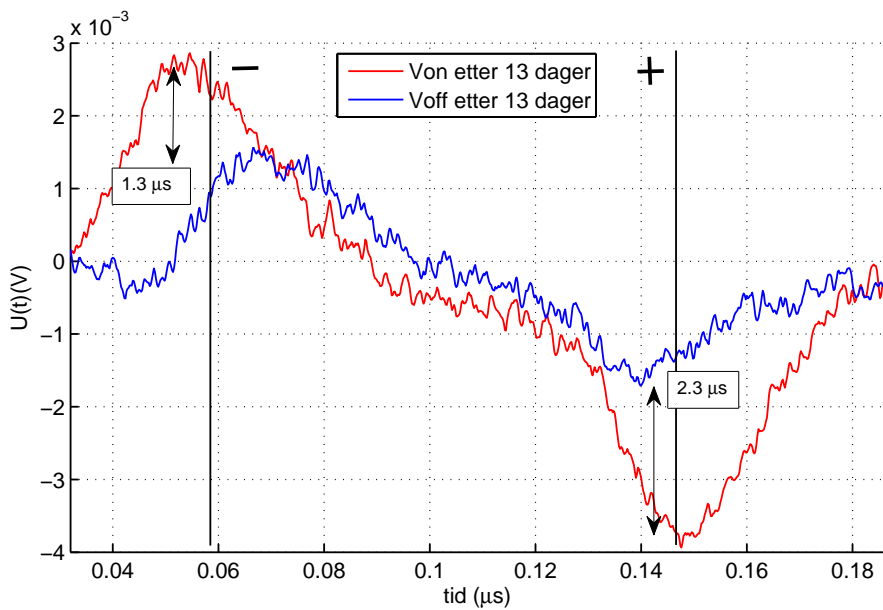
Fra 2 dager til 9 dager reduseres amplituden ved grensesjikt katode-isolasjon noe, se figur 36. Elektroden ser ut til å bevege seg inn mot bulk i denne perioden og homoladninger akkumuleres. Fra 9 dager dannes det gradvis en ny 'elektrode' ved katode. Denne har amplitudeverdi over sensitivitetsgrensen og har hetero akkumulasjon i tidsrommet 9 dager til 18 dager.

Ved grensesjikt anode-isolasjon holder amplituden seg stabil med noe oscillasjon i tidsrommet 2 dager til 18 dager.

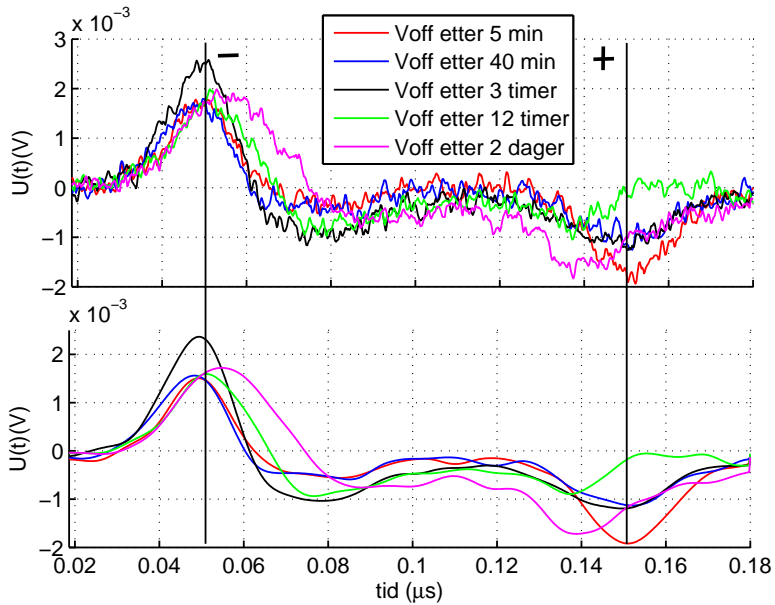
Feltforsterkningen oscillerer i tidsrommet 2 dager til 18 dager. Feltforsterkningen går fra å være størst ved katode etter 2 dager til å være størst i bulk og nært anode i tidsrommet 9 dager til 18 dager.



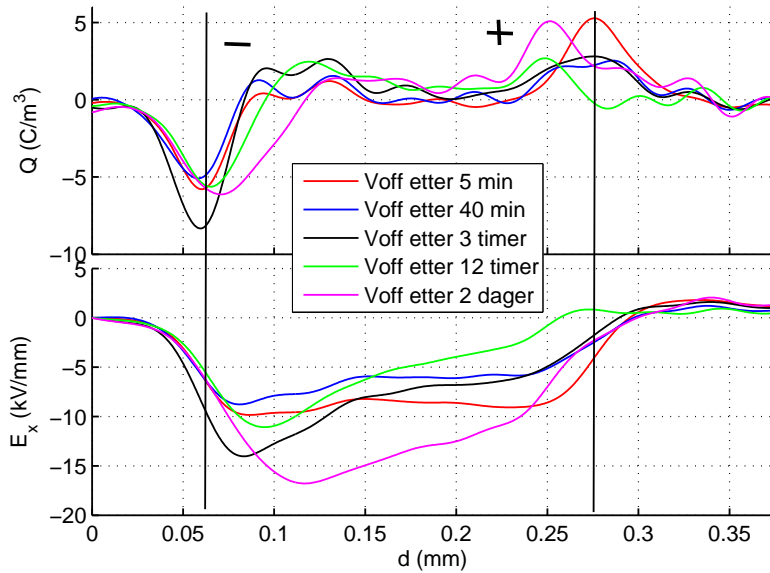
Figur 32 – Kalibreringsrespons for måleserie #F3.



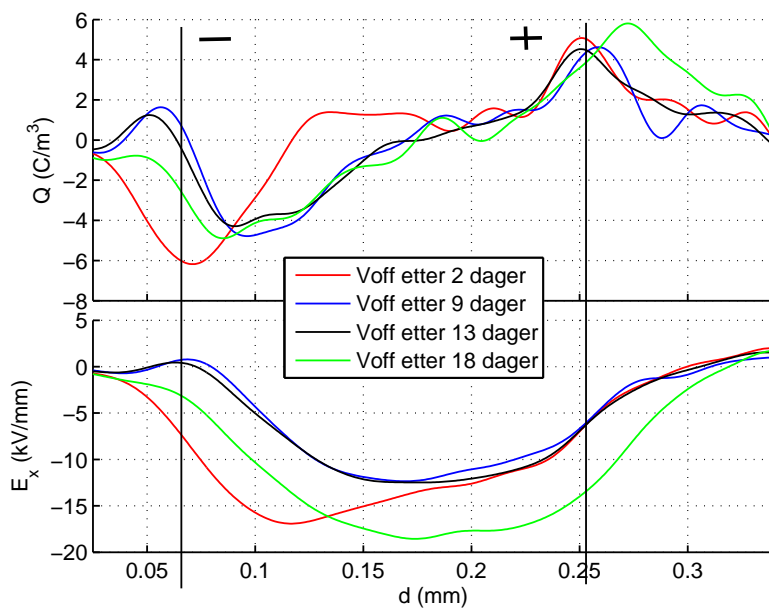
Figur 33 – Plott av rådata med spenning av og på etter 13 dager for måleserie #F3.



Figur 34 – Plott av rådata med spenning av, før(over) og etter(under) utglating for måleserie #F3 - 5 min til 2 dager.



Figur 35 – Felt- og romladningsutvikling for måleserie #F3 - 5 min til 2 dager.



Figur 36 – Felt- og romladningsutvikling for måleserie #F3 - 2 dager til 18 dager.

5 Diskusjon

Hovedformålet med denne oppgaven har vært å igangsette målinger av og kartlegge årsaken til romladningsakkumulasjon i kryssbundet polyetylen. Dette ble gjort på flate prøver og miniatyrkabel ved forskjellige påtrykte elektriske HVDC-felt. Flate prøver besto av halvleder og polyetylen som er kryssbundet sammen og påsputtet gull. Miniatyrkabel besto av halvleder-elektroder og polyetylen. Det ble bruk PEA-målemetode for å utføre målingene. Resultatene fra måleseriene som ble utført vil i dette kapitlet bli diskutert opp mot tilgjengelig faglitteratur og forskningsresultater.

5.1 Kalibrering

Materialrespons

Materialresponsen ved kalibrering av miniatyrkabel ble detekterbar ved gjennomsnittlig påtrykt elektrisk feltstyrke på 15 kV/mm. Da måleseriene ble gjennomført med gjennomsnittlig elektrisk feltstyrke på 20 og 25 kV/mm, utgjør 15 kV/mm henholdsvis 75 og 60 % av kontinuerlig spenning påtrykt måleseriene.

Materialresponsen ved kalibrering av flate prøver ble detekterbar ved gjennomsnittlig elektrisk feltstyrke på 10 og 12.5 kV/mm. Da måleseriene ble gjennomført med gjennomsnittlig elektrisk feltstyrke på 15, 20 og 25 kV/mm utgjør kalibreringsspenningen henholdsvis 83, 63 og 40 % av kontinuerlig spenning påtrykt måleseriene.

Med så høy kalibreringsspenning vil påvirkning fra eventuelle 'raske' injiserte ladninger i isolasjonen kunne bidra til ukorrekte kalibreringsmålinger som igjen vil kunne påvirke den endelige beregnede romladningsakkumulasjonen og feltforsterkningen [4].

Amplitudeverdiene på elektroderesponsen ved kalibrering er i samme størrelsesorden for begge måleseriene kjørt på miniatyrkabel. Disse amplitudeverdiene er betydelig mindre enn både Voff og Von logget kort tid etter oppstart av begge måleseriene. Differansen i amplitudeverdi mellom Von og Voff er svært lav. En liten differanse i amplitudeverdi mellom Von og Voff kan tilsi at mye av ladningene som påtrykkes prøven ved Von blir igjen i prøven ved Voff i form av elektrisk felt. Ved sammenligning av amplitudeverdien til rådata kort tid etter start av måleserien med kalibreringsresponsen til miniatyrkabel observeres det at ladninger bygger seg relativt raskt opp i den.

Amplitudeverdiene på elektroderesponsen ved kalibrering av flate prøver er i samme størrelsesorden for måleserie #F1 og #F2. For #F3 er det noe mindre amplitudeverdier. Dette er som forventet da feltstyrken ved kalibrering brukt i #F3 er noe lavere enn de første to måleseriene. Differansen mellom Von og Voff er markant større ved flate prøver enn ved miniatyrkabel. Dette kan tilsi at ladninger som påtrykkes prøven ved Von er mindre stabil og trekkes

raskt ut fra prøven ved Voff. Amplitudeverdiens bredde på elektroderespon- sen ved kalibrering er relativt brei iforhold til den totale tykkelsen til prøven.

Refleksjoner

Materialresponen ved kalibrering av miniatyrkabel viser oscillering i bulk av prøve. I beregninger gjort for å kalkulere avstanden fra katode inn til oscille- ringene brukes lydets hastighet som en konstant gitt i tabell 1, se figur 12 og 17. I realiteten vil denne hastigheten variere og være sterkt avhengig av tem- peraturen i materialet[3]. Bredden på amplitudene i oscilleringene er relativt store. Dette tatt i betraktning med den sterkt temperaturavhengige akustiske hastigheten i isolasjonen og halvlederen vil alle oscilleringer, med et unntak, kunne være et resultat av refleksjoner som genereres i overgang mellom elek- trode, isolasjonsskjerm og isolasjon. Refleksjonene vil genereres på grunn av forskjellig akustisk impedans i materialene[2]. Unntaket(oscilleringen nær- mest katode i figur 12 og 17) er for nært katoden for å være en refleksjon og kan være en del av elektroderesponen, eller et resultat av 'raske' injiserte ladninger i isolasjonen.

Kalibreringsfaktor

For hver måleserie regnes det ut en kalibreringsfaktor. Kalibreringsfaktoren er basert på overflateladninger logget under kalibrering ved elektroden nær- mest transduser, se figur 5. Kalibreringsfaktoren er avhengig av både bredden til amplituden og dens maksverdi. Kalibreringsfaktoren kalkuleres av egne algoritmer i matlab, etter at det har blitt tatt hensyn til dekonvolusjon.

Ved både flate prøver og miniatyrkabel er overflateladningenes amplitude- verdier ved kalibrering relativt lave. Dette i kombinasjon med høy signal- til støy-ratio resulterer i at overflateladningens areal ved detekterende elektrode er sterkt avhengig av hvor start- og sluttpunkt for Δt blir satt, se ligning (2.12). Et lite avvik i start- og sluttpunkt for Δt vil påfølgende kunne på- virke størrelsen på kalibreringsfaktoren betydelig og resultere i forvrengning i fremstillingen av akkumulert romladning og feltforsterkning, og spesielt størrelsesordenen på disse. Dette vil kunne resultere i at romladningsakku- mulasjon og feltforsterkningen ikke blir korrekt fremstilt og størrelsesorde- nen på disse er feil. Trender over tid i plott av romladningsakkumulasjon og feltforsterkning vil likevel kunne sammenlignes på tvers av måleserier da relativ bevegelse av akkumulert romladning i samme måleserie er beregnet med samme kalibreringsfaktor.

5.2 Romladningsakkumulasjon og feltutvikling

5.2.1 Miniatyrkabel

Måleserie #K1

Oscillasjonen som er synlig i kalibreringsplottet er også synlig i plott av

rådata, se figur 12 og 13. Avstanden fra katode inn til oscilleringsene er tilnærmet lik for begge figurene. Denne oscilleringen gjenspeiles i romladningsutviklingen som er presentert i figur 15 og 16.

Amplitudeutviklingen i grensesjikt elektroder-isolasjon, i isolasjonen nært katoden og i bulk kan antyde at den tilsynelatende akkumuleringen av ladninger i isolasjonen er en kombinasjon av flere mekanismer. Disse kan være akustiske refleksjoner fra grenseområde mellom isolasjonsskjerm og isolasjon, noe økende hetero romladningsakkumulering i isolasjonen nært elektrodene og økende homo akkumulering i grensesjikt elektrode-isolasjon.

Utviklingen i akkumuleringen stopper opp etter 40 min og er tilnærmet uendret frem til 40 dager, med noe oscillering. Dette kan tilsi at eventuelle romladninger akkumuleres hurtig i isolasjonen etter at den er spenningsatt, før stasjonær verdi oppnås etter kort tid.

Feltutviklingen fra 10 min til 40 dager viser noe oscillering i feltforsterkningen over tid, med størst feltforsterkning ved anode, noe som er i samsvar med radiell feltfordeling.

Måleserie #K2

Oscillasjonen som er synlig i kalibreringsplottet er i denne måleserien ikke like synlig i plott av rådata, se figur 17 og 18. Amplitudeutviklingen i grensesjikt elektroder-isolasjon i plott av romladningsakkumulering kan antyde økende homo ladningsakkumulering. Den fraværende utviklingen i romladningsakkumuleringen i isolasjonen nært katoden som er synlig i rådata kan være et resultat av dekonvolusjon i forhold til form på amplitude ved detekterende elektrode. Gjennom hele måleserien er det lite akkumulerte romladninger i isolasjonen. Det er noe oscillering i bulk, og denne er som regel under sensitivitetsgrensen til måleutstyret.

Feltutviklingen i #K2 har en lineær vekst fra anode til katode ved samme måletidspunkt frem til 2.5 timer. Denne lineære veksten avtar noe fra 2.5 timer frem til 26 dager. Feltforsterkningen er størst ved anode, noe som er i tråd med radiell feltfordeling.

5.2.2 Flate prøver

Flate prøver er ekstrudert, kryssbundet og kondisjonert. Ved kryssbinding av polyetylen dannes det restprodukter i materialet. Ved kondisjonering er det ment at mesteparten av disse restproduktene skal trekkes ut av materialet[7].

For alle tre måleserier kjørt på flate prøver sees det få timer etter oppstart en antydning til heteroakkumulering i bulk nært katode. En slik akkumulering er ikke synlig ved anode. Denne heteroakkumuleringen ser ut til å bevege seg inn mot bulk over tid.

En rask akkumulering og forflytning av hetero romladninger kan si noe om hvilke ledningsmekanismer som er aktive i isolasjonen, samt indikere at restprodukter fra kryssbinding er tilstede i isolasjonen[7]. Restproduktene kan

sees på som flyktige og vil kunne bære ladninger som molekylære ioner fra katode til anode.

Dette underbygges av akkumulert homo ladninger i grensesjikt anode-isolasjon fra start av samtlige måleserier. Denne akkumulasjonen oscillerer over tid og i #F2 kan det sees tegn på en blokkeringseffekt (se figur 31) ved denne elektroden. Denne blokkeringen er ikke like fremtredende ved #F1 og #F3. En lignende blokkeringseffekt er blitt observert i tidligere forsøk gjort på flate prøver[8].

Det er tidligere gjort romladningsmålinger på isolasjon som er 100 % tykkere bestående av lik PEX med like kondisjoneringsforhold, men ulikt elektrode-materiale ved katode[8]. Det ble da registrert betydelig større mengder akkumulerte heteroladninger i isolasjonen nært elektrodene, noe som kan antyde at mengde og hastighet på utgassing av restprodukter er sterkt avhengig av prøvetykkelsen. Dette er i samsvar med tidligere rapporterte funn, hvor det påpekes en sterk sammenheng mellom tykkelsen på prøven og hvor raskt den blir utgasset[5]. Dette kan underbygges av at det er heteroakkumulasjon kun ved katode og ikke ved anode, siden halvlederelektroden er kryssbundet sammen med katodesiden og kan redusere utgassingshastigheten av restprodukter fra denne siden av isolasjonen.

I grensesjikt katode-isolasjon er det akkumulert homo ladninger fra start ved samtlige måleserier. Denne akkumulasjonen når raskt en toppverdi, reduserer sin amplitude og beveger seg inn mot bulk i samsvar med heteroakkumulasjon i isolasjon nær katode. Det sees også antydninger til heteroakkumulasjon i katodeområdet etter 2 dager i #F1 og #F3.

Denne romladningsutviklingen over tid i grensesjiktet er ikke samsvarende med romladningsutvikling i tidligere forsøk gjort på flate prøver med samme PEX[8]. Utviklingen kan også komme av feltassistert ionisering av urenheter og restprodukter i isolasjon nært katode som ikke har blitt utgasset på grunn av en blokkeringseffekt fra halvledermaterialet.

Akkumulasjon av homoladninger i grensesjiktet elektrode-prøve vil kunne antyde injeksjon av elektroner og hull. Disse injiserte ladningene, samt feltassistert ionisering av urenheter i testobjektene og restprodukter vil kunne være med å danne romladningene.

Ladningsflukt fra den ene elektroden til den andre kan skyldes ladninger som hopper mellom feller i materialet ved å få tilført kinetisk energi fra termisk og fononsk stimulering[10]. (På denne måten beveger de seg fra felle til felle igjennom materialet).

Feltforsterkningen i samtlige tre måleserier er tilsynelatende svært høy, med verdier opp mot 90 % av påtrykt feltstyrke. Med bakgrunn i usikkerheten rundt korrekt størrelse på kalibreringsfaktor for måleseriene vil størrelsesordenen på disse feltforsterkningene være høyst usikre og mest sannsynlig ikke korrekte. Det samme gjelder størrelsesordenen på mengden akkumulert romladning.

5.3 Feilkilder

Små endringer i tykkelse, temperatur, hydrostatisk trykk og luftfuktighet i og rundt de spenningsatte testobjektene kan ha stor påvirkning på akkumulasjonen av romladninger i isolasjonen. Små vibrasjoner i miljøet rundt målecellene vil også kunne påvirke måleresultatene da målingen av romladninger gjøres piezoelektrisk.

Overflateladningenes amplitudeverdier ved kalibrering er relativt lave både for miniatyrkabel og flate prøver. Dette i kombinasjon med relativt høy signal- til støy-ratio kan resultere i feil valg av settpunktene, Δt , ved beregning av kalibreringsfaktor. Dette vil være en kilde til feil ved beregning av romladningsakkumulasjon og feltforsterkning ut fra rådata for flate prøver og miniatyrkabel.

For flate prøver og miniatyrkabel er det behov for relativt høy påtrykt feltstyrke for å få materialrespons. Siden dette kan resultere i raske injiserte ladninger i isolasjonen kan dette bidra til ukorrekte kalibreringsmålinger og påfølgende være en kilde til feil.

Kalibrerings- og måleresultat på miniatyrkabel tilsier at mye av de registre romladningene i realiteten vil kunne være akustiske refleksjoner fra grensesjiktet halvleder-isolasjon, noe som kan gi et feilaktig bilde av romladningsakkumulasjonen og feltforsterkningen.

6 konklusjon og videre arbeid

6.1 konklusjon

Ut fra diskusjon konkluderes det med følgende:

- De høye påtrykte elektriske feltene som er nødvendig for å få material-respons i flate prøver og kabel bidrar til mindre nøyaktige beregnede kalibreringsfaktorer. Dette vil resultere i at romladningsakkumulasjon og feltforsterkning ikke blir korrekt fremstilt.
- Flate prøver har størst amplitudedifferanse mellom spenning på(Von) og spenning av(Voff) i rådata logget gjennom PEA-måleoppsett. Dette tilsier at det blir gjenværende mer ladninger i LS4201S enn LE4201 når kontinuerlig påtrykt DC-spenning blir slått av.
- Isolasjonen i miniatyrkabelen blir kort tid etter igangsetting av måle-seriene mettet av romladninger. Det er lite akkumulasjon av romladninger i miniatyrkabel ved påtrykte feltstyrker på 20 og 25 kV/mm. Måleresultatene er preget av mye støy fra akustiske refleksjoner generert i grensesjiktet halvleder-isolasjon samt i grensesjiktet halvleder-detekterende elektrode.
- Akkumulasjon av romladning i flate prøver er et resultat av injeksjon av elektroner og hull fra elektrodene og feltassistert ionisering av restproduktene fra kryssbindingen.
- Valg av elektrodemateriale har stor betydning for romladningsdistribusjonen i flate prøver bestående av LE4201.

6.2 Videre arbeid

For å bedre kunne fastslå hvilke ladningsbærere som er aktive og hvordan romladninger oppstår foreslås følgende videre arbeid:

- Undersøke utladningstiden for akkumulerte romladninger i kabel som er tidlig mettet av romladninger.
- Undersøke romladningsdistribusjon i LE4201 som er kryssbundet sammen med halvlederelektroder på begge sider av isolasjonen.
- Undersøke sammenhengen mellom temperaturgradient og romladningsdistribusjon i miniatyrkabel.
- Forbedre algoritmer brukt for å analysere rådata.

Referanser

- [1] Belma Alijagic-Jonuz. *Dielectric Properties and Space Charge Dynamics of Polymeric High Voltage DC Insulating Materials*. PhD thesis, Technische Universiteit Delft, 2007.
- [2] R. Bodega. *Space Charge Accumulation in Polymeric High Voltage DC Cable Systems*. PhD thesis, Technische Universiteit Delft, 2006.
- [3] U.B. Buchholz, M. Jaunich, W.S. Stark, W.H. Habel, and B.A.T. Petersson. Acoustic data of cross linked polyethylene (xlpe) and cured liquid silicone rubber (lsr) by means of ultrasonic and low frequency dmta. *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, 19(2):558–566, april 2012.
- [4] G. Chen, Y. L. Chong, and M. Fu. calibration of the pulsed electroacoustic technique in the presence of trapped charge. *Measurement Science and Technology*, 17(1):1974–1980, June 2006.
- [5] Y.L. Chong, G. Chen, I.L. Hosier, A.S. Vaughan, and Y.F.F. Ho. Heat treatment of cross-linked polyethylene and its effect on morphology and space charge evolution. *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, 12(6):1209 – 1221, dec. 2005.
- [6] J.C. Fothergill, G.C. Montanari, G.C. Stevens, C. Laurent, G. Teyssedre, L.A. Dissado, U.H. Nilsson, and G. Platbrood. Electrical, microstructural, physical and chemical characterization of hv xlpe cable peelings for an electrical aging diagnostic data base. *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, 10(3):514 – 527, june 2003.
- [7] M. Fu, G. Chen, L. A. Dissado, and J. C. Fothergill. Influence of thermal treatment and residues on space charge accumulation in xlpe for dc power cable application. *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, 14(1):53 –64, feb. 2007.
- [8] Lars Møllersen Hallsteinsen. Romladningsdistribusjon i xlpe hvdc kabelisolasjon - flate prøver og kabel. Master's thesis, Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet, 2011.
- [9] N. Hussin and G. Chen. Analysis of space charge formation in ldpe in the presence of crosslinking byproducts. *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, 19(1):126 –133, february 2012.
- [10] J.C Fothergill J.A Dissado. "Electrical Degradation and Breakdown in Polymers". The Institution of Engineering and Technology, London, United Kingdom, 1992.
- [11] Ruth Helene Kyte. Romladningsdistribusjon i pex-isolerte hvdc-kabler. Master's thesis, Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet, 2011.

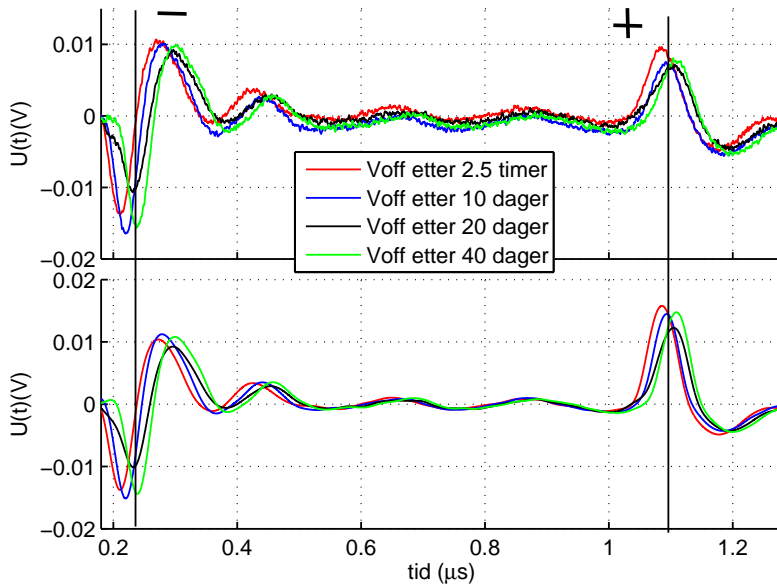
- [12] F.N. Lim, R.J. Fleming, and R.D. Naybour. Space charge accumulation in power cable xlpe insulation. *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, 6(3):273 –281, jun 1999.
- [13] T. Maeno, T. Futami, H. Kushibe, T. Takada, and C.M. Cooke. Measurement of spatial charge distribution in thick dielectrics using the pulsed electroacoustic method. *Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, 23(3):433 –439, jun 1988.
- [14] TechImp Systems". *PEA CABLE SYSTEM operator's manual*. TechImp Systems, Viale Toscana 11/c 40069 Zola Predosa, Italy.
- [15] TechImp Systems. *PEA FLAT SYSTEM operator's manual*. TechImp Systems, Viale Toscana 11/c 40069 Zola Predosa, Italy.
- [16] D Bloor T Blythe. *"Electrical properties of polymers"*. Cambridge University Press, Cambridge CB2 8RU, United Kingdom, 2005.
- [17] W. C. C. Tze. *Space Charge Determination in HVDC Power Cable and its Influence on Electric Field*. PhD thesis, University of Southampton, 2010.

A Vedlegg

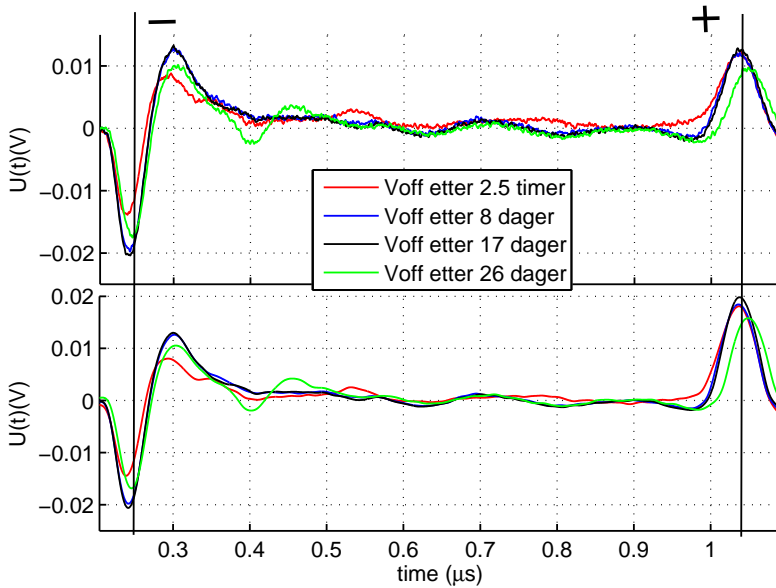
| Tidspunkt for måling i antall minutter etter oppstart av måleserie | |
|--|---------------|
| Flate prøver | Miniatyrkabel |
| 5 | |
| 10 | 10 |
| 20 | 20 |
| 40 | 40 |
| 60 | 60 |
| 80 | 80 |
| 100 | 100 |
| 120 | 120 |
| 150 | 150 |
| 180 | 180 |
| 240 | 240 |
| 300 | 300 |
| 360 | 360 |
| 420 | 420 |
| 480 | 480 |
| 540 | 540 |
| 600 | 600 |
| 660 | 660 |
| 720 | 720 |
| 780 | 780 |
| 840 | 840 |
| 960 | 960 |
| 1020 | 1020 |
| 1080 | 1080 |
| 1140 | 1140 |
| 1200 | 1200 |
| 1260 | 1260 |
| 1320 | 1320 |
| 1380 | 1380 |
| 1440 | 1440 |
| 2880 | 2880 |

Målinger utføres en gang hvert døgn frem til måleserien avsluttes

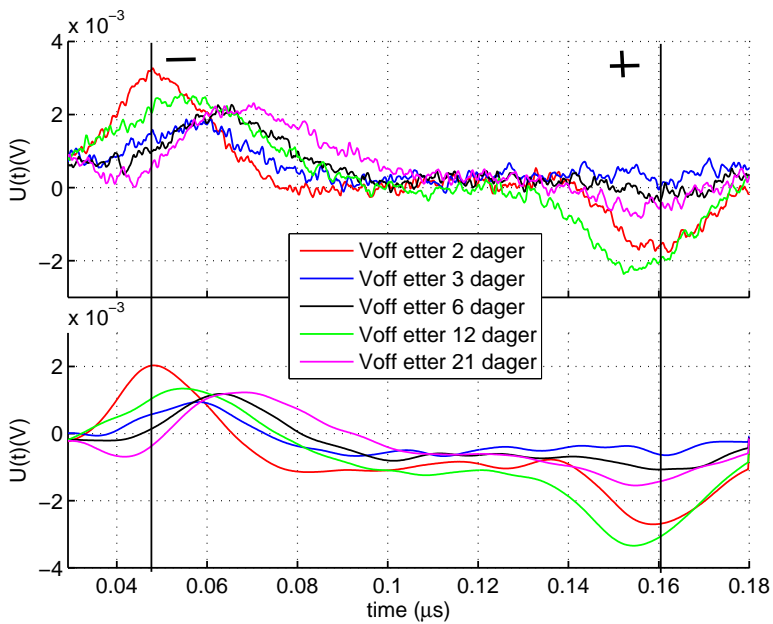
Figur 37 – Oversikt over måletidspunkt for testobjekt og miniatyrkabel.



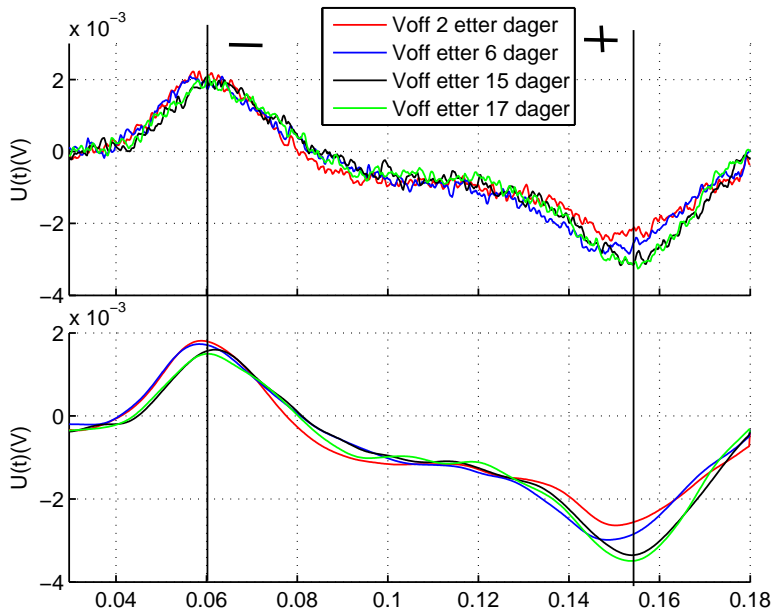
Figur 38 – Plott av rådata med spenning av, før(over) og etter utglating(under). Måleserie #K1 - 2.5 timer til 40 dager.



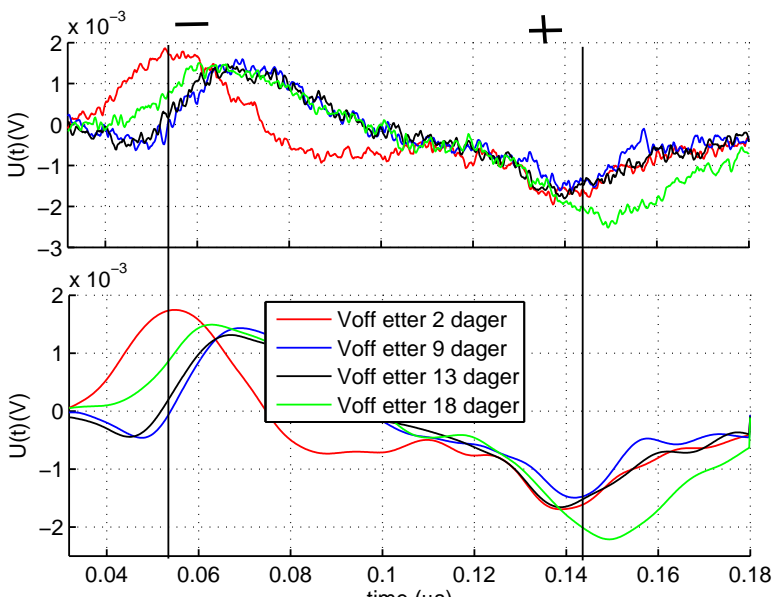
Figur 39 – Plott av rådata med spenning av, før(over) og etter utglating(under). Måleserie #K2 - 2.5 timer til 26 dager.



Figur 40 – Plott av rådata med spenning av, før(over) og etter utglating(under). Måleserie #F1 - 2 dager til 21 dager.



Figur 41 – Plott av rådata med spenning av, før(over) og etter utglating(under). Måleserie #F2 - 2 dager til 16 dager.



Figur 42 – Plott av rådata med spenning av, før(over) og etter utglating(under). Måleserie #F3 - 2 dager til 18 dager.