

Romladningsdistribusjon i lagdelt XLPE HVDC kabelisolasjon

Jens Eirik Hagen

Master i energi og miljø

Innlevert: juni 2014

Hovedveileder: Frank Mauseth, ELKRAFT

Medveileder: Øystein Hestad, Sintef

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Institutt for elkraftteknikk

Problem description

Space Charge Distribution in Polymeric HVDC Cable Systems

Due to the increasing demand for supply of reliable electric power, installations of more high capacity and long distance high voltage DC cable transmissions are required. During the latest decades extruded polymeric insulation has been the dominant choice of insulation for HVAC cable technology and there is a strong incentive to develop and produce HVDC cables with extruded polymeric insulation; cables that offers the same benefits – flexibility, lower weight and cost-effectiveness – as the AC transmission cables.

Cable joints and terminations in a polymeric HVDC insulation system is regarded as the most critical parts of the cable systems. It is desirable to study the space charge distribution within the polymeric HVDC insulation with interfaces, e.g. an insulation system with two different polymers, and accordingly the electric field distribution within the entire polymeric insulation system. Knowledge on the role of space charges in insulation systems with interfaces under DC stress is essential when designing HVDC accessories and the Master thesis will be an important contribution to research and development of cable accessories.

This Master thesis is mainly experimental, and will consist of measurements on both flat samples and miniature cables.

Supervisor: Frank Mauseth, NTNU

Co-supervisor: Øystein L. G. Hestad, SINTEF Energy Research AS

Forord

Denne oppgaven er avsluttende masteroppgave utført ved Institutt for elkraftteknikk ved Norges teknisk-naturvitenskapelig universitet (NTNU), våren 2014.

Jeg vil gjerne takke mine to veiledere Frank Mauseth og Øystein Hestad for alltid være tilgjengelige for spørsmål og veiledning i alle faser av oppgaven. For hjelp med gode løsninger for gjennomføring, praktisk laboratoriearbeid og analyse av resultater.

Torbjørn Ve for hjelp med praktisk laboratoriearbeid i forbindelse med konduktivitetstesting og prosessering av målingene. Dag Linhjell for praktisk laboratoriearbeid i forbindelse med pådamping av elektroder.

Til min familie, venner og ikke minst til kontorfellesskapet for god oppmuntring og støtte gjennom året!

Takk skal dere ha!

Trondheim, 13. juni 2014

Jens Eirik Hagen

Sammendrag

Etterspørselen etter ekstrudert kabelisolasjon for HVDC har ført til at industrien stadig utvikler nye isolasjonsmaterialer ved å tilføre nye tilsetningsstoffer og benytte renere materialer. Dette for å håndtere høyere overføringskapasitet og problemer knyttet til romladningsdistribusjon, temperaturavhengighet og ledningsevne. Utviklingen mot høyere spenningsnivå øker påkjenningene og påliteligheten til kabelsystemet, og ikke minst på kabelskjøter og termineringer. Kabelskjøter og termineringer er ansett som de mest kritiske delene av et kabelsystem.

Denne masteroppgaven har som formål å undersøke romladningsdistribusjonen og den korresponderende elektriske feltutviklingen i isolasjon med grenseflater og i miniatyrkabler bestående av et nyere kryssbundet polyetylen for HVDC.

I den forbindelse har utviklingen av romladninger blitt målt ved *Pulsed Electro-Acoustic method* for flate og sylindriske testobjekter. Flate testobjekter har bestått av lagdelt isolasjon av HVAC- og HVDC-materiale. Miniatyrkabelen har bestått av HVDC-materiale. I tillegg har ledningsevnen til HVDC-materialet blitt målt i Rogowskikopper og sammenlignet med tidligere målinger av ledningsevnen til HVAC-materiale.

For flate testobjekter har målinger blitt utført ved påtrykt gjennomsnittsfelt på henholdsvis 20, 30 og 40 kV/mm. Måleseriene har hatt en varighet på 5 til 18 døgn. Flere målinger er utført ved 20 og 30 kV/mm for å undersøke reproduserbarhet.

For miniatyrkabler har det blitt utført målinger på henholdsvis 20, 30 og 40 kV/mm. Måleseriene har hatt en varighet på 9 til 18 døgn.

Resultatene til lagdelt isolasjon viste en markant utvikling av negative ladninger i grenseflaten mellom HVAC- og HVDC-isolasjonen. Utviklingen førte til en feltendring med reduksjon på 17 - 30 % ved katoden i HVDC-materialet og økning på 16 - 50 % av påtrykt gjennomsnittsfelt ved anoden i HVAC-materialet.

Ledningsevnen til HVDC-materialet ble målt til:

$$3,0 \cdot 10^{-16} e^{0,0498E+0,0533T} \left[\frac{S}{m} \right] \quad (1)$$

Sammenlignet med HVAC-materialet som tidligere er målt til:

$$1,0 \cdot 10^{-18} e^{0,1454E+0,1347T} \left[\frac{S}{m} \right] \quad (2)$$

HVDC-materialet har en lavere temperatur- og feltavhengighet. Ledningsevnen til HVDC-materialet er høyere ved 20°C og lavt påtrykt felt. Ved felt over 20 kV/mm har HVDC-materialet lavere konduktivitet enn HVAC-materialet. Resultatene forøvrig gir ingen sikre indikasjoner på hvilke mekanismer som er styrende for ladningstransporten og akkumulasjonen av ladninger. En av årsakene er PEA-målecellens lave oppløsning. Det kan være sannsynlig at andre egenskaper som oksidering, urenheter, ufullstendig kryssbinding og høyere konsentrasjon av amorfe regioner i grenseflaten kan ha en vesentlig betydning for akkumulasjonen av negative ladninger i regionen.

Måleseriene til miniatyrkabel viste en markant utvikling av heteroladninger ved katoden. Generelt stabiliseres utviklingen langt raskere i miniatyrkabelen enn i flateprøvene. Stabilisering ble observert etter 1 - 2 døgn sammenliknet med 9 - 18 døgn for flate lagdelte testobjekt. Utviklingen førte til en markant feltøkning ved katoden på 56 % og 53 % av påtrykt gjennomsnittsfelt, på henholdsvis 30 og 40 kV/mm.

Resultatene bekreftet tidligere forsøk på at hullinjeksjon og fanging av hull er de dominerende mekanismene bak ladningsinjeksjon og transport av ladninger ved halvledende elektrode. En hurtige utvikling og stabilisering av romladninger er antatt å skyldes at halvledende materiale har en struktur som er lik kryssbundet polyetylen sammenliknet med metallelektrode av gull som er benyttet på flate testobjekt.

Abstract

The demand for extruded HVDC cable insulation has led the cable industry to constantly put pressure on the chemical companies to develop new insulation materials by adding new additives and using cleaner materials. This is done to handle higher transmission capacity and problems related to space charge distribution, temperature dependence and conductivity.

A higher voltage level increases strains and reliability of the cable system, especially on the cable joints and terminations. Cable joints and terminations in polymeric HVDC insulation systems are considered the most critical parts of a cable system.

This Master thesis is mainly experimental, and aims to investigate the space charge distribution and the corresponding electric field enhancement in insulation with interfaces and model cables consisting of a newer cross-linked polyethylene for HVDC.

The space charge distribution was measured using *Pulsed Electroacoustic Method* for flat and cylindrical test specimens. The flat test specimens consisted of layered cross-linked insulation for HVAC and HVDC extruded cables. The model cables consisted of cross-linked insulation for HVDC extruded cables. The conductivity of the HVDC insulation has been measured in Rogowski cups and compared with the conductivity of the HVAC insulation.

For flat specimens, the measurements have been carried out at an average applied field stress of 20, 30 and 40 kV/mm. The measurements have been conducted in duration of 5 to 18 days. Several measurements are conducted at 20 and 30 kV/mm in order to examine the reproducibility.

For model cables, measurements have been carried out at an average applied field stress of 20, 30 and 40 kV/mm. The measurements have been conducted in duration of 9 to 18 days.

In flat samples of layered insulation, a significant build up of negative charges in the dielectric interface led to a considerable field distortion. The accumulated space charge led to a field reduction of 17-30 % at the cathode in HVDC material and increase of 16-50 % of the applied average field at the anode in HVAC material.

The conductivity of the HVDC-insulation was measured to:

$$3,0 \cdot 10^{-16} e^{0,0498E+0,0533T} \left[\frac{S}{m} \right] \quad (3)$$

Compared to the conductivity of the HVAC-insulation, previously measured to:

$$1,0 \cdot 10^{-18} e^{0,1454E+0,1347T} \left[\frac{S}{m} \right] \quad (4)$$

The cross-linked HVDC-insulation has a lower temperature and field dependence. Conductivity of HVDC material is higher at 20°C and at low applied electric fields. For fields higher than 20 kV/mm, the HVDC-insulation has a lower conductivity than the HVAC-insulation.

The results in general provide no reliable indication of the mechanisms that govern charge transport and accumulation of space charges, this is partly due to the low resolution of the PEA-cell. It may be likely that other properties such as oxidation, impurities, incomplete crosslinking and a higher concentration of amorphous regions in the interface, can have a significant impact on the accumulation of negative charges at the interface, besides the effect of a difference in conductivity.

In model cables, a significant development of hetero charges at the cathode was observed. The development reached a stable state at a more rapid rate compared to flat samples. Stabilization was observed after 1 - 2 days compared to 9 - 18 days in flat layered specimens. The space charge distribution led to a significant field enhancement at the cathode of 56 % and 53 % of the applied averaged field, respectively at 30 and 40 kV/mm. The high field enhancement might be due to higher level of noise in the signal processing.

The results were in accordance with previous experiments that hole injection and trapping of holes are likely to be the dominant mechanisms of charge injection and transport of charge carriers when semiconducting electrodes are used. A rapid development and stabilization of space charge is believed to be due to the semiconducting material has a structure that is more similar to cross-linked polyethylene compared to metal electrode of gold, which has been used on the flat samples.

Innhold

1	Introduksjon	1
1.1	Bakgrunn og motivasjon	1
2	Teori	3
2.1	Polymer som dielektrisk materiale	3
2.1.1	Polyetylen	4
2.1.2	Kryssbinding	4
2.2	Konduktivitet	5
2.3	Romladningsakkumulasjon og feltforsterkning	7
2.4	Ladningsinjeksjon og transport	8
2.4.1	Energibånd	8
2.4.2	Ionisk transport	10
2.4.3	Elektronisk transport	10
2.4.4	Ladningsinjeksjon fra elektrodene	11
2.4.5	Klassifisering etter ladningsposisjon	13
2.4.5.1	Homoladning	13
2.4.5.2	Heteroladning	13
2.4.6	Polarisering	14
2.5	Detektering av romladninger	16
2.5.1	Pulsed electro-acoustic method (PEA)	16
2.5.2	Kalibrering	17
2.6	Måling av ledningsevne	18
3	Metodikk	19
3.1	Fremstilling av lagdelte flateprøver	19
3.1.1	Ekstrudering	20
3.1.2	Støping og kryssbinding	21
3.1.3	Kryssbinding av lagdelte testobjekter	22
3.1.4	Utgassing	23
3.1.5	Ionesputting - gull	23
3.2	Fremstilling av koppobjekter	24
3.2.1	Pådamning av aluminium	24
3.3	Modifikasjon av miniatyrkabel	25
3.4	Måleoppsett	26
3.4.1	Flate testobjekt	26

3.4.2	Miniatyrkabler	27
3.4.3	Måling av ledningsevne	28
4	Resultat	30
4.1	Flate testobjekter av lagdelt isolasjon	30
4.1.1	Lagdelte testobjekter av AC- og DC-materiale	32
4.1.1.1	Testobjekt #1 (20 kV/mm)	32
4.1.1.2	Testobjekt #2 (20 kV/mm)	36
4.1.1.3	Testobjekt #3 (30 kV/mm)	39
4.1.1.4	Testobjekt #4 (30 kV/mm)	42
4.1.1.5	Testobjekt #5 (40 kV/mm)	46
4.1.2	Effekten av dobbel kryssbinding mot enkelkryssbinding i lagdelt isolasjon	49
4.2	Miniatyrkabel bestående av DC-materiale	51
4.2.1	#M2 (30 kV/mm)	51
4.2.2	#M3 (40 kV/mm)	54
4.3	Konduktivitet til DC-isolasjonsmateriale	57
5	Diskusjon	61
5.1	Flate testobjekt av lagdelt isolasjon	61
5.2	Miniatyrkabel	66
6	Konklusjon	69
7	Forslag til videre arbeid	71
A	Vedlegg	75
A.1	Tverrsnitt av flate testobjekter	75
A.2	Råsignaler	77
A.2.1	Flate testobjekt	77
A.2.2	Miniatyrkabler	80
A.3	Lagdelte flateprøver av AC- og DC-materiale	81
A.3.1	Romladningsakkumulasjon over tid	81
A.4	Flate testobjekt DC-materiale - feltendring	83
A.5	Ledningsevne	83
A.6	Måletidsrom - LabView	84

Kapittel 1

Introduksjon

1.1 Bakgrunn og motivasjon

Markedet for ekstruderte HVDC-kabelsystemer har økt betydelig de siste årene drevet av utenlandsforbindelser, offshore vindkraft og strømforsyning til olje- og gassinstallasjoner. Med mål om å øke overføringskapasiteten har systemspenningen økt gradvis fra det første ekstruderte HVDC-kabelprosjektet i Gotland i 1997 på 80 kV til 320 kV som i dag installeres på offshore-vindparkene DolWin (1-2), BorWin2, SyllWin1 og i utenlandsforbindelsen mellom Sverige og Litauen[1].

Masseimpregnert papirisolasjon (MI) for HVDC-kabler er fortsatt mest utbredt siden innføringen av teknologien i begynnelsen av 1950-tallet[1]. Hovedfordelen med MI-kabler er veletablert pålitelighet for høy overføringskapasitet. Likevel er en stor del av nyere forskning og utvikling rettet mot ekstruderte HVDC-kabler som følge av fordeler som blant annet lavere vekt, høyere driftstemperatur, kortere produksjonstid og relativt kort skjøtetid.

I begynnelsen, ved introduksjonen av ekstrudert kabelisolasjon for HVDC, ble erfaringene og materialene utviklet for ekstrudert HVAC-isolasjon benyttet. I etterkant har de samme materialene blitt optimalisert for HVDC-isolasjon[2].

En av hovedutfordringene med ekstrudert HVDC-isolasjon er akkumulasjon av romladninger. Romladninger som er tilstede i isolasjonen vil påvirke det elektriske feltet over isolasjonen. Feltet kan økes i et område og reduseres i et annet. Summen av feltet induert av ladningene og det påtrykte feltet kan, som konsekvens, redusere den effektive tykkelsen på isolasjonen.

Ved overføring av AC inverteres strømretning raskt slik at romladninger ikke har tid til og utvikles. Ved overføring av DC holdes spenningspolariteten konstant slik at romladninger akkumuleres over tid. Ved en eventuell kortslutning, eller endring av spenningspolaritet, opplever isolasjonen summen av det elektriske feltet, forårsaket av de gjenværende romladningene, og feltet induert av like-

spenningen. En slik situasjon kan føre til kritisk feltforsterkning ved den indre lederen i kabelen. For å unngå slike situasjoner er bruken av ekstrudert HVDC-kabelisolasjon begrenset til IGBT-baserte omformere (VSC) der strømretningen endres og spenningspolariteten holdes konstant¹.

Utviklingen mot stadig høyere spenningsnivå øker påkjenningene og påliteligheten til kabelsystemet og ikke minst på kabelskjøter og termineringer. Kabelskjøter og termineringer i HVDC polymerisolasjon er ansett som de mest kritiske delene av et kabelsystem[2].

I den forbindelse har romladningsfordelingen og den korresponderende elektriske feltutviklingen i kryssbundet HVDC-isolasjon med grenseflater blitt studert, i tillegg til romladningsdistribusjon i minatyrkabler bestående av et nytt kryssbundet HVDC-materiale.

¹Et unntak er en overføringsforbindelse i Japan mellom Hokkaido og Honshu hvor en ekstrudert HVDC-kabel ble installert i 2012. Overføringsforbindelsen ble installert i et eksisterende anlegg der LCC (line-commutated converter) var installert[1].

Kapittel 2

Teori

2.1 Polymer som dielektrisk materiale

Et perfekt dielektrisk materiale er et isolerende materiale uten transport av elektroner, elektronhull eller ioner. I virkeligheten eksisterer ikke den perfekte isolatoren. I høyspenningsanlegg er polymerbaserte dielektriske materialer mye brukt som følge av svært gode dielektriske egenskaper som høy sammenbruddsstyrke (normalt $\sim 10^9 Vm^{-1}$), lave dielektriske tap ($\tan(\delta) < 10^{-3}$) og høy DC resistivitet (normalt $10^{16} \Omega m$). Dette kombinert med muligheter for stor mekanisk styrke, høy korrosjonsresistans og forholdsvis enkel produksjonsprosess og lave kostnader [3].

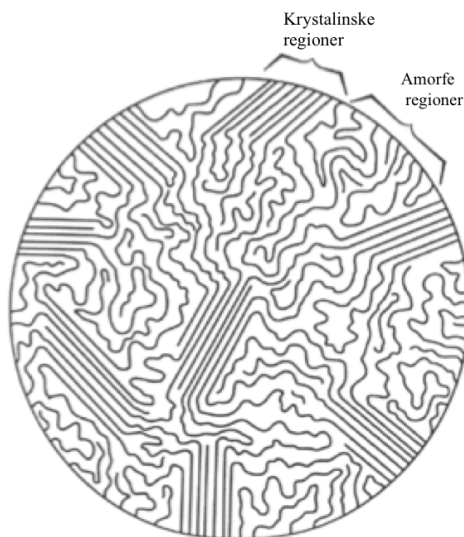
Polymerer som dielektrisk materiale tilsettes ofte tilsetningsstoffer for å fremme ulike egenskaper, og for å redusere kostnader. De kan deles i tre hovedkategorier[3]:

- (i) Hjelpstoffer som blir brukt opp under produksjonsprosessen og katalysatorkomponenter som brukes under kryssbindingen. Det ferdige kryssbundne materialet vil inneholde reststoffer fra hjelpestoffene.
- (ii) Tilsetningsstoffer, tilsatt i små konsentrasjoner ($< 10\%$) for å fremme driftsegenskaper som blant annet beskyttelse mot varme og ultra-fiolett stråling, forhindre oksidasjon, fremme flyteegenskaper.
- (iii) Sammensatte ingredienser¹ blir benyttet i større konsentrasjoner (10 – 70 %) for å endre egenskapene til polymeren under produksjon og drift. De deles inn i fyllstoff og mykner. Fyllstoff benyttes for å redusere kostnader og fremme de mekaniske egenskapene og varmeresistansen. Mykner reduserer skjørheten til det dielektriske materialet og forbedrer flyteegenskapene under produksjon.

¹Oversatt fra ordet compounding ingredients.

2.1.1 Polyetylen

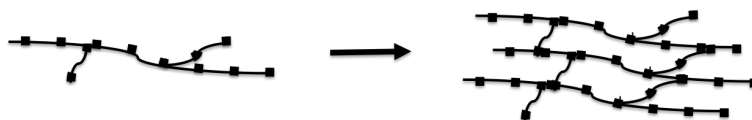
Semikrystalinsk Polyetylen (PE) er basisen for polymerbasert isolasjon i HVDC-kabler. Polyetylen er et termoplastisk kunststoff fremstilt av gassen eten C_2H_4 . I ferdig form er polyetylen et langkjedet polymer med en repeterende CH_2 -enhet. Etter hver 30 - 100 repeterende enhet kan sidekjeder oppstå som forstyrrer den regelmessige formen[4]. I regioner der kjedene ligger mer vilkårlig skapes amorfe regioner, og i områder hvor kjedene ligger parallelt dannes krystalinske regioner. I amorfe regioner kan uønskede kjemiske urenheter akkumuleres og representerer en viktig faktor i formasjonen av romladninger og for ladningstransporten[3, 5]. Polyetylen kan deles opp i lav tetthet (LDPE) og høy tetthet (HDPE) etter graden av krystalisering. De mekaniske forskjellene mellom de er store: HDPE er lite fleksibelt i motsetning til LDPE som er fleksibelt og dermed mer egnet som kabelisolasjon. Med lavere grad av krystalinitet blir resistiviteten lavere og ledningsevnen høyere som igjen påvirker akkumulasjonen av romladninger[6].



Figur 2.1: I semikrystalinsk polyetylen vil det være områder med krystalinske og amorfe regioner. Parallele kjeder gir krystalinske regioner, vilkårlige kjeder gir amorfe regioner[7].

2.1.2 Kryssbinding

Kryssbinding av polyetylen dannes ved en vulkaniseringsprosess hvor kjemiske kryssbindinger fører til direkte tilknytning mellom polyetylenkjedene. Dette oppnås ved oppvarming av ekstrudert polyetylen under høyt trykk. Kryssbinding fører til et høyere smeltepunkt som muliggjør høyere driftstemperatur. I tillegg kan en høyere grad av fyllstoff tilsettes uten vesentlige forringelse av de dielektriske egenskapene sammenlignet med polyetylen [3, 4]. Kryssbinding er ofte realisert kjemisk ved hjelp av peroksider, typisk dikumylperoksid [1].



Figur 2.2: Kryssbinding mellom polyetylenkjedene[1].

Etter kryssbinding vil restprodukter forekomme. Restproduktene kan påvirke de dielektriske egenskapene og være en bidragsyter til akkumulasjon av romladninger. Det meste av restproduktene vil bli fjernet ved utgassing, men noe vil være igjen. Mengden gjenværende restprodukter kan avhenge av blant annet tykkelsen på isolasjonen og lengden av kondisjoneringen[8]. Vanlige reststoffer fra kryssbindingen er metan, acetofenon og kumylalkohol[9].

2.2 Konduktivitet

Når spenning påtrykkes mellom to punkter på et materiale dannes et elektrisk felt. Feltet avhenger av blant annet geometrien til materialet, og for et isotermt og homogent felt uten romladninger gjelder:

$$E_0 = \frac{U_0}{d} \quad (2.1)$$

der U_0 er påtrykt spenning og d er tykkelsen på materialet.

Ved sylindrisk konfigurasjon vil den elektriske feltfordelingen være gitt som funksjon av radien :

$$E_0(r) = \frac{U_0}{r \ln \frac{r_{ytre}}{r_{indre}}} \quad (2.2)$$

Gjennomsnittsfeltet beregnes ved:

$$E_{gj.snitt} = \frac{U_0}{r_{ytre} - r_{indre}} \quad (2.3)$$

I et materiale med påtrykt elektrisk felt vil ladede partikler få en elektrostatisk kraft i retning av det elektriske feltet lik produktet av sin ladning [C] og det elektriske feltet [Vm^{-1}]. Frie ladninger vil *drifte* gjennom materialet i retning av feltet.

Ladningstransport er også mulig ved diffusjon hvor en tilfeldig bevegelse av enkelt ladede partikler resulterer i en nettobevegelse av ladninger fra et område med høy konsentrasjon til et området med lavere konsentrasjon. Der hastigheten

til ladningstransporten er gitt ved enheten for elektrisk strøm [Cs^{-1}, A].

Ohm's lov(2.4) kan uttrykkes i forhold til materialparametrene: felt og strømtetthet som (2.5):

$$I = \left(\frac{1}{R}\right)V \quad (2.4)$$

$$J = \frac{1}{\rho}E = \sigma E \quad (2.5)$$

hvor ρ er resistiviteten til materialet [Ωm] og $\sigma = \frac{1}{\rho}$ er konduktiviteten [$(\Omega m)^{-1}$]. Dette tilsier at den gjennomsnittlige *drifhastigheten* til ladningene i retning av feltet er proporsjonal med påtrykt felt.

Som følge av at konduktiviteten til et materiale avhenger av blant annet krystallinet, driftstemperatur og produksjonshistorie, kan konduktiviteten variere mellom ulike prøver med likt materiale[3]. Konduktiviteten til et materiale som følge av i ulike ladningsbærere er gitt ved:

$$\sigma_i = n_i e_i \mu_i \quad (2.6)$$

hvor n er konsentrasjonen, e er den elektriske ladningen [C] og μ er mobiliteten [$m^2 V^{-1} s^{-1}$] til ladningsbærer i . I et materiale vil det være flere ulike ladningsbærere som bidrar til den samlede konduktiviteten (elektroner, hull, protoner, positive og negative ioner). Det er derfor mer hensiktsmessig å uttrykke konduktiviteten som en sum av flere mekanismer:

$$\sigma = \sum_i^N |n_i e_i \mu_i| \quad (2.7)$$

Selv om den totale konduktiviteten til et materiale avhenger av flere ulike ladningsbærere er det sannsynlig at en ladningsbærer vil dominere, og at endringen i konduktiviteten i større grad må forklares på grunnlag av store variasjoner mellom n , e og μ . I faste isolasjonsmaterialer er variasjonene i den elektriske ladningen e , ansett for å være minimal og av mindre betydning for de store variasjonene i konduktivitet sammenlignet med produktet av ladningens mobilitet μ og konsentrasjon n [3].

2.3 Romladningsakkumulasjon og feltforsterkning

Akkumulasjon av romladninger oppstår når det er ubalanse mellom ladningstransporten inn i et område og ladningstransporten ut av et område. Balansen kan uttrykkes gjennom strømkontinuitetsligningen[10]:

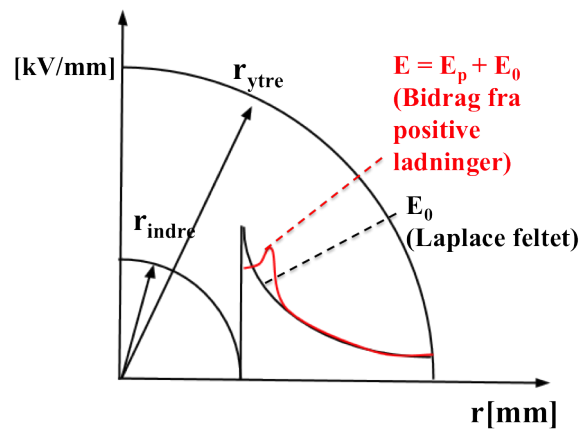
$$\nabla \cdot \vec{j} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (2.8)$$

hvor j er strømtettheten, ρ er romladningstettheten og t er tiden. Med akkumulasjon av romladning vil det introduseres et nytt bidrag til det elektriske feltet gitt ved Gauss' lov:

$$\rho = \nabla \cdot (\epsilon_0 \epsilon_r \vec{E}_\rho) \quad (2.9)$$

hvor ϵ_0 er permitiviteten i vakuum og ϵ_r permitiviteten til materialet. Det totale elektriske feltet vil da være summen av romladningsfeltet E_p og påtrykt felt E_0 (Laplace-feltet):

$$E = E_0 + E_p \quad (2.10)$$



Figur 2.3: Elektrisk feltfordeling ved sylindrisk konfigurasjon med bidrag fra positive romladninger.

For testobjekt med parallell platekonstruksjon kan den prosentvise maksimale feltøkningen som følge av romladning regnes ut[10]:

$$F_{E\%} = \frac{E_{maks} - \frac{U_0}{d}}{\frac{U_0}{d}} \cdot 100 \quad (2.11)$$

hvor E_{maks} er den maksimale feltøkningen i absolutt verdi observert i testobjektet, U_0 er påtrykt spenning og d er tykkelsen til objektet.

For sylindriske testobjekt er Laplace-feltet omvendt proporsjonalt med radien og må derfor regnes ut med hensyn på hvor i testobjektets maksimale feltforsterkning er observert[10]:

$$F_{E\%} = \frac{E(r) - \frac{U_0}{d}}{\frac{U_0}{d}} \cdot 100 \quad (2.12)$$

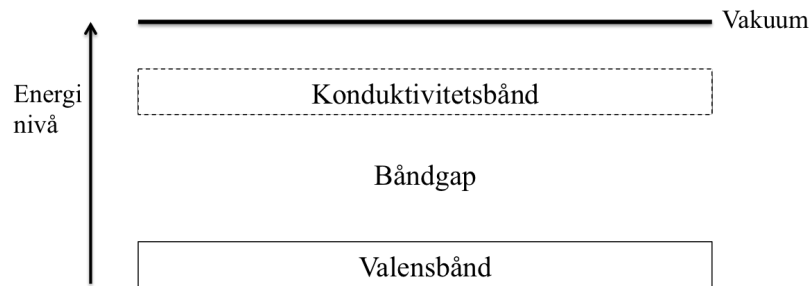
2.4 Ladningsinjeksjon og transport

Transporten av ladninger kan klassifiseres etter hvilken type ladningsbærer som er aktiv. Litteraturen skiller mellom ionisk transport og elektronisk transport. Typen ladningsbærer som er primært ansvarlig for transporten avhenger ikke kun på materialets kjemiske og fysiske oppbygning, men også påtrykt felt, temperatur og frekvens, i tillegg til faktorer som elektrodekonfigurasjon og fuktighet[3].

2.4.1 Energibånd

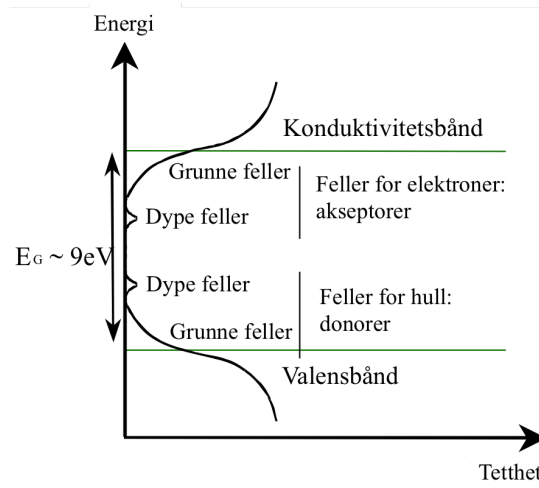
Det er nyttig å forstå forskjellen mellom isolatorer, halvledere og ledere i et energibånd-perspektiv. Virkemåten kan forklares gjennom Niels Bohr's atommodell. Elektroner beveger seg i stasjonære baner eller i tilstander rundt kjernen av et atom. Hver bane representerer et energinivå. Et elektron kan hoppe fra en bane til en annen ved at atomet mottar eller avgir energi gjennom elektromagnetisk stråling. I valensbåndet er elektroner fast koblet til det bestemte atomet. Mellom valensbåndet og konduktivitetsbåndet ligger båndgapet. Ingen elektroner kan oppstå i båndgapet. Et elektron fra valensbåndet kan nå ledningsbåndet bare hvis den mottar tilstrekkelig energi til å passere båndgapet i et steg. Det samme gjelder for hull. Materialets ledningsevne avhenger av størrelsen på båndgapet. Hvis båndgapet er stort, er det lite sannsynlig at et elektron kan passere gapet og bidra til ledningsevnen. Bredden på gapet er uttrykt i elektronvolt [eV]. Båndgapet for en isolator er større enn 2 eV, for en halvleder 0,2 - 1 eV og for en leder mindre enn 0,2 eV[3, 6].

Ladningstransport foregår for det meste i de amorfe regionene i polyetylen. Elektron- og hulltransport foregår langs polyetylenkjedene hvor vanlig kjede konformasjoner opprettholdes[3].



Figur 2.4: Energibånddiagram forklart gjennom Niels Bohr's atom modell. Et elektron fra valensbåndet kan nå konduktivtetsbåndet hvis den mottar tilstrekkelig energi til å passere båndgapet i et steg[3].

Ufullstendig bundne atomer i krystaldefekter gir opphav til frie forbindelser som kan tilfredstilles ved enten fjerning eller donering av et elektron (eller begge) og fungerer derfor som tilstander i båndgapet. Disse områdene finnes i nærheten av kjemiske eller strukturelle defekter (ofte amorfne regioner). Elektroner og hull i disse lokaliserte tilstandene er ikke tilgjengelig for ledning og må tilføres betydelig energi for å komme ut av tilstandene. Felle for elektroner er ofte betegnet akseptorer, og felle for hull er ofte betegnet donorer. Donorer har energinivå like over toppen på valensbåndet, og akseptorer har energinivåer like under bunnen av ledningsbåndet[3].



Figur 2.5: Bånddiagram viser energinivåer mellom valens- og konduktivtetsbånd. Donorer har energinivå like over toppen på valensbåndet og akseptorer har energinivåer like under bunnen av ledningsbåndet[11].

Et fanget elektron, eller hull kan reorientere den lokale strukturen og dermed danne en potensialbrønn som kan føre til at *rømming* blir vanskelig. Disse betegnes egenfeller². Egenfelle er en type felle hvor romladning av en polaritet i

²Oversatt fra self-traps

en region ikke er kompensert med en lik konsentrasjon av en ladning med motsatt polaritet. Dette fører til lokal feltforsterkning og kan beregnes ved Poisson's likning 2.13[3]:

$$\nabla E = \frac{\rho_c}{\epsilon} \quad (2.13)$$

der ρ_c er romladningstettheten (Cm^{-3}) og ϵ er permitiviteten. Egenfeller kan være dype og kan holde på ladninger fra noen timer til dager.

Forekomsten av fellene er sterkt relatert til tilsetningsstoffene i polymeren. Små forskjeller i tilsetningsstoffer kan ha store innvirkninger på antall feller. Det gjør det spesielt interessant å sammenligne ulike kryssbundne materialer, og spesielt isolasjonsmaterialer beregnet for overføring av HVDC og HVAC.

2.4.2 Ionisk transport

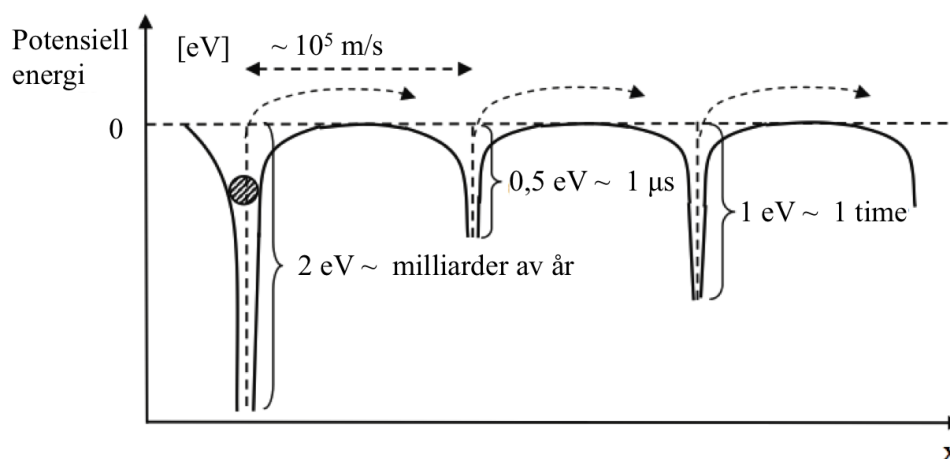
Ioner er elektrisk ladede atomer som kan dannes i grenseflaten elektrode-isolasjon og i bulk som følge av dissosiasjon av urenheter og kjemiske tilsetningsstoffer. Ionisk transport er massetransport, og da metallektrodene kun kan injisere og ekstrahere elektroner, kan ionisk transport ikke forsette i det uendelige uten at det dannes nye ioner over tid[3]. Ionisk transport deles opp i:

- (i) Indre ionisk ledning forårsaket av dissosiering av hovedmolekylet eller sidegrupper etterfulgt av overføring av protoner og/eller elektroner gjennom hydrogenbundne nettverk.
- (ii) Ytre ionisk ledning forårsaket av urenheter eller kjemiske tilsetningsstoffer (reststoffer fra kryssbinding) som ikke er en del av den kjemiske strukturen til polymer.

2.4.3 Elektronisk transport

Elektroner kan bli fanget av akseptorer, eller ioniserte donorer. Hull kan bli fanget av donorer, eller ioniserte akseptorer. For å forlate fellene må ladningene overvinne store potensialbarrierer ved hjelp av termisk-eksitasjon. Det forenkles ved blant annet høyere påtrykt felt[3]. En frigjort ladning vil bli tiltrukket neste felle. En mekanisme for elektron/hull transport er *termisk aktivert hopping*³ ved at elektroner/hull får nok energi til overvinne potensialbarrieren ved termisk fluktuasjoner. En annen alternativ mekanisme der elektroner/hull kan bevege seg fra en felle til den neste, er ved kvantemekanisk *tunneling*.

³Oversatt fra thermally activated hopping



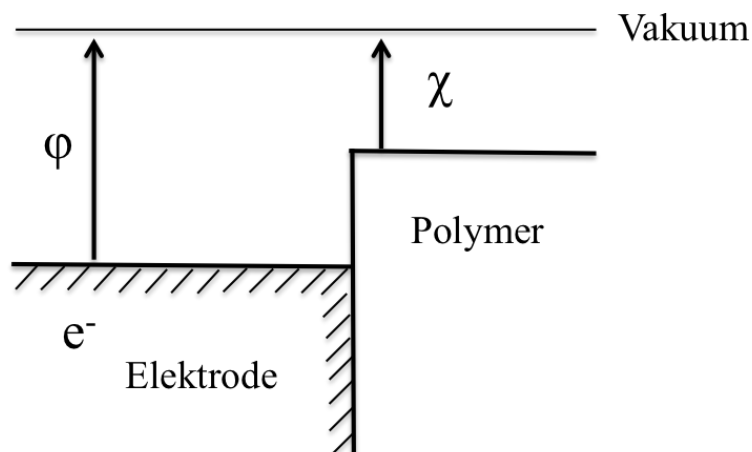
Figur 2.6: Elektronisk transport gjennom et dielektrisk materiale. Diagrammet viser ladningstransport gjennom *termisk aktivert hopping*. Tiden elektroner/hull tilbringer i en felle er vesentlig lengre enn ladningstransporten mellom fellene. [12]

Elektroner beveger seg raskt mellom feller med en gjennomsnittlig hastighet på 10^5 m/s. Elektroner bruker mer tid til å være fanget enn å bevege seg mellom fellene. I grunne feller, kan tiden være kort. For feller med dybde mindre enn 0,5 eV, kan fangsttiden ved 20°C være mindre enn $1 \mu\text{s}$. I feller med med dybde over 1 eV, kan fangst tiden være flere timer[13].

2.4.4 Ladningsinjeksjon fra elektrodene

Injeksjon av elektroner ved katoden og ekstraksjon av elektroner ved anoden er hovedmekanismen for transport av ladninger i polyetylen. Den videre transporten av ladninger er dominert av elektroner og hull og i mindre grad av ioner.

Ladningsinjeksjon beskrives ofte gjennom to mekanismer: *Fowler-Nordheim injeksjon* og *Schottky-injeksjon*. Ved begge injeksjonsmekanismene må ladningene tilføres tilstrekkelig med energi slik at de kan overgå den potensielle energibarrieren for å vandre fra elektroden og inn i isolasjonen. Høyden på den potensielle barrieren avhenger av grenseflaten mellom elektroden og isolasjonen. Figur 2.7 viser et eksempel på enkelt bånddiagram.



Figur 2.7: Potensialbarriere ved grenseflate metall-polymer. Φ er den potensielle energi-barrieren [eV] som må overvinnnes for å migrere inn i polymeren[3].

Energien som er nødvendig for at elektroner skal overgå den potensielle energi-barrieren er gitt ved likning 2.14.

$$W = \Phi - \chi \quad (2.14)$$

Hvor Φ er arbeidsfunksjonen⁴ til metallet og χ er elektronaffinitet⁵.

Schottky-injeksjon er gjeldene for *lave* felt opp til 100 kV/mm. Høye elektriske felt reduserer både høyden og bredden på barrieren. Ved *Schottky-injeksjon* er strømtettheten gitt ved likning 2.15 og er avhengig av temperatur T og elektrisk felt E [3]:

$$J = AT^2 \exp\left[-\frac{\Phi - e\sqrt{\frac{eE}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r}}}{kT}\right] \quad (2.15)$$

Der A er en konstant, T er temperatur og Φ er den totale høyden på potensialbarrieren.

Ved felt over 100 kV/mm er *Fowler-Nordheim* en mulig mekanisme. Grunnet høyt påtrykt felt, reduseres tykkelsen på barrieren, slik at transport av elektroner kan foregå gjennom en tunnel-mekanisme. Elektroner kan dermed transporteres gjennom barrieren til tross for utilstrekkelig energi til å hoppe over til neste felle. Strømtettheten er sterkt avhengig av det elektriske feltet, og har ingen eller svært liten temperaturavhengighet:

$$J = BE^2 \exp\left[\frac{-C\varphi^{\frac{3}{2}}}{E}\right] \quad (2.16)$$

⁴Energien som kreves for at elektron skal løsrives fra metallet[14].

⁵Grunnstoffenes tilbøyelighet til å ta opp elektroner og danne negative ioner[14]

Hvor B og C er konstanter og $\varphi = \Phi - E_{fermi}$.

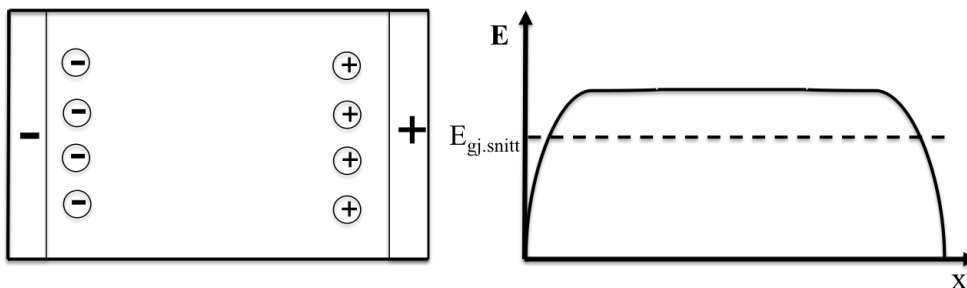
Potensialbarrieren er i virkeligheten mer komplisert som følge mange ulike forhold: elektrodemateriale, kontaktflatetrykk, kjemiske og elektriske defekter som overflateruhet, oksidering, fuktighet og andre urenheter, lokal polarisering med mer[3, 5, 15].

2.4.5 Klassifisering etter ladningsposisjon

Akkumulerte romladninger er normalt betegnet homoladninger og heteroladninger etter polariteten til tilstøtende elektrode. Homoladninger betyr lik ladningspolaritet som den nærmeste elektroden, og heteroladninger antyder motsatt polaritet som nærmeste elektrode [5].

2.4.5.1 Homoladning

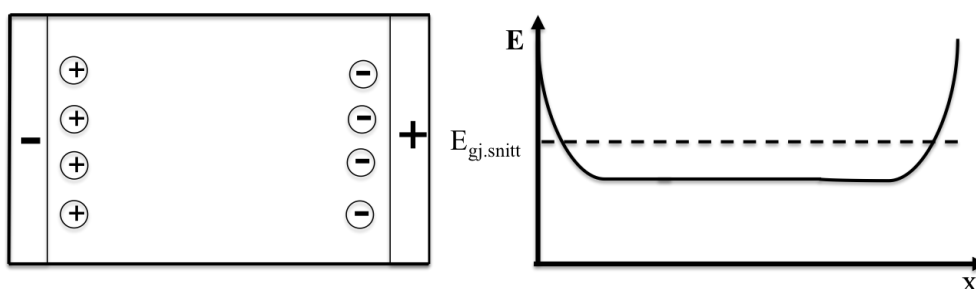
Homoladninger dannes ved fanging av injiserte ladninger med lik polaritet som tilstøtende elektrode, og foregår når ladningsinjeksjon fra elektrodene skjer hurtigere enn ladningstransporten i materialet[1]. Generelt vil en opphopning av homoladninger ved grenseflaten mellom elektrode og isolasjon redusere feltbelastningen til tilstøtende elektrode, og samtidig øke feltbelastningen i bulk[5].



Figur 2.8: Ladninger kan klassifiseres etter polariteten til tilstøtende elektrode og fører til redusert feltbelastning ved elektrodene[1].

2.4.5.2 Heteroladning

Heteroladninger dannes ved feltassistert ionisering av kjemiske stoffer og urenheter i bulk. Ved påtrykt elektrisk felt vil ionene migrere til elektrodene med motsatt polaritet hvor de kan bli fanget i feller. I dette tilfellet foregår ladningstransport hurtigere enn ladningsinjeksjon[1]. Heteroladninger kan også dannes ved at en av elektrodene delvis blokkerer ekstraksjonen av frie ladninger injisert fra den andre elektrodene. Generelt vil en opphopning av heteroladninger føre til økt feltbelastning på en eller begge elektrodene og redusere feltbelastningen i bulk[5].



Figur 2.9: Ladninger kan klassifiseres etter polariteten til tilstøtende elektrode og fører til økt feltbelastning ved elektrodene[1].

Den viktigste effekten av romladninger er forandring av feltet og dannelse av lokale områder med høy feltforsterkning. Ved tilstrekkelig høy utviklingen av romladninger kan den korresponderende lokale feltforsterkningen overstige materialets sammenbruddstyrke og i verste fall føre til svikt. Områder med høy feltforsterkning kan føre til dannelse av svake punkter i isolasjonen som igjen kan være en forløper til tidlig aldring av isolasjonen[1].

Ved et polaritetskifte vil akkumulasjonen av homoladninger ved grenseflaten til elektrodene raskt omgjøres til heteroladninger. De lokale områdene med redusert feltbelastning vil straks bli omgjort til områder med høy feltbelastning.

Likeledes vil en rask transformasjon av heteroladninger til homoladninger i grenseflatene føre til rekombinering og mulig skade på materialstrukturen[1].

2.4.6 Polarisering

Elektronisk

Elektronisk polarisering dannes når et atom blir påtrykt et elektrisk felt. Den positive atomkjernen og elektronene forskyves i hver sin retning i et midlertidig dipolmoment proporsjonalt med feltet. Polariseringen er momentan og vil forsvinne når feltet fjernes[4].

$$P_e = \kappa_e E \quad (2.17)$$

Ionisk

I molekyler med ionbinding mellom atomene vil det dannes ionisk polarisering ved påtrykt elektrisk felt. De positive og negative ionene utsettes for krefter som forskyver ionene i forhold til hverandre i et resulterende dipolmoment. Polariseringen er momentan og vil forsvinne når feltet fjernes[4].

$$P_i = \kappa_i E \quad (2.18)$$

Dipol

I enkelte materialer er molekylene bygd opp med permanente dipoler. Ved fravær av elektrisk felt vil dipolene være vilkårlig orientert slik at det resulterende dipolmomentet blir lik null. Ved påtrykt elektrisk felt vil dipolene forsøke å innrette seg etter feltet. I gass og væsker er dipolene frie, og polarisering P_d er tilnærmet proporsjonal med feltet. For faste stoffer er ikke dipolene frie, og sammenhengen mellom polarisering, felt og temperatur må bestemmes eksperimentelt. Dipolarisering er karakterisert som en relaksjonsmekanisme[4].

$$P_d = \kappa_d E \quad (2.19)$$

Grenseflatepolarisering

Maxwell-Wagner polarisering (MW) kan benyttes for å beskrive akkumulasjonen av romladning i grenseflaten i lagdelt isolasjon. Ifølge MW vil en akkumulasjon av ladninger i grenseflaten oppstå hvis forholdet mellom mellom konduktiviteten og permittiviteten mellom materialene er ulikt⁶[16].

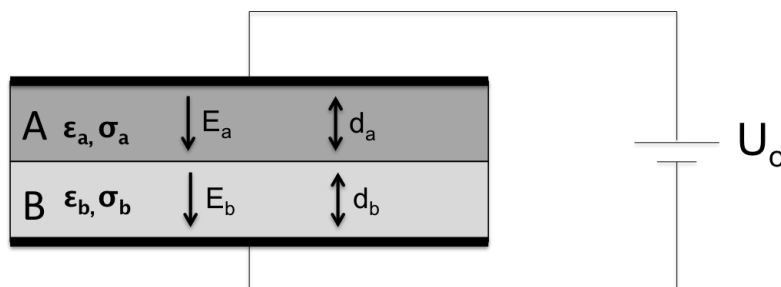
Akkumulasjonen av romladninger i grenseflaten kan uttrykkes matematisk når DC spenning U_0 er påtrykt:

$$\kappa(t) = \frac{\epsilon_A \sigma_B - \epsilon_B \sigma_A}{\sigma_A d_B + \sigma_B d_A} U_0 (1 - \exp(-\frac{t}{\tau_{MW}})) \quad (2.20)$$

Her er $\kappa(t)$ den tidsavhengige romladningen i grenseoverflaten, d_A, d_B er tykkelsen på den lagdelte isolasjonen, σ_A, σ_B er konduktivitene og ϵ_A, ϵ_B er permittiviteten på de ulike materialene.

Tidskonstanten er gitt ved likning (2.21):

$$\tau = \frac{d_A \epsilon_B + d_B \epsilon_A}{d_A \sigma_B + d_B \sigma_A} \quad (2.21)$$



Figur 2.10: Lagdelt isolasjon med ulik konduktivitet og permittivitet[16].

⁶De fleste kommersielle kryssbundne materialer inneholder fyllstoff med forskjellige ledningsevner og permittiviteter enn vertsmaterialet. Fyllstoffene kan dermed representere en rekke grenseflater i materialet.

2.5 Detektering av romladninger

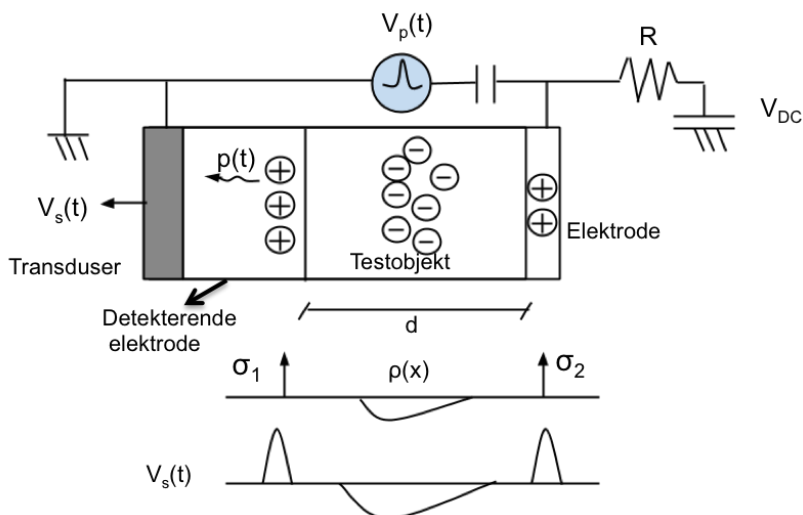
2.5.1 Pulsed electro-acoustic method (PEA)

For detektering av romladninger i testobjektene benyttes *Pulsed electro-acoustic method*. Det finnes flere metoder for detektering av romladninger, men PEA er mest utbredt som følge av enkelt oppsett, lav kostnad og enkel implementering[17].

Måleprinsippet kan forklares gjennom diagrammet presentert i figur 2.11. Et dielektrisk materiale med tykkelse d er plassert mellom to aluminiumselektroder. Som følge av en påtrykt DC spenning V_{dc} , akkumuleres romladninger $\rho(x)$ i testobjektet over tid (avsnitt 2.2 og 2.3). Romladningene blir detektert som følge av en påtrykt elektrisk puls, $V_p(t)$. Pulsen inducerer en forstyrrende kraft som fører til en bevegelse av ladningene. Bevegelsen genererer en akustisk trykkbølge $p(t)$ som propagerer gjennom testobjektet og til den detekterende elektroden i lydens hastighet. Det akustiske signalet fanges opp av en piezoelektrisk transduser der signalet blir konvertert til et tidsavhengig elektrisk signal $V_s(t)$ [17, 18]:

$$V_s = K[\sigma_1 + \sigma_2 + v_{sa}\Delta T\rho(x = v_{sa}t)]e_p \quad (2.22)$$

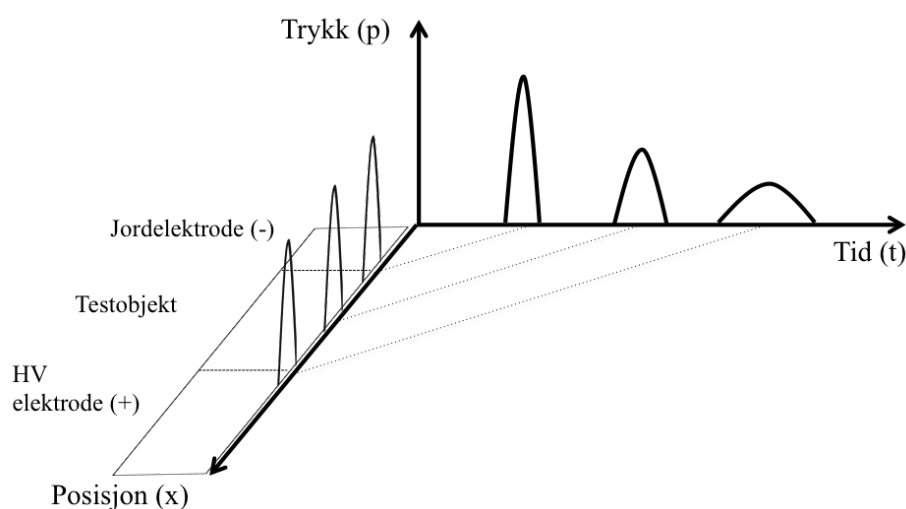
der σ_1 og σ_2 er overflateladninger på elektrodene, v_{sa} er lydens hastighet gjennom materialet, ΔT er pulslengden, ρ er ladning, e_p er amplituden til påtrykt puls og K er kalibreringskonstanten.



Figur 2.11: Skjematisk presentasjon av Pulsed Electro-acoustic method for detektering av romladninger i et isolasjonsmateriale[17].

2.5.2 Kalibrering

Som følge av attenuasjon (demping) og dispersjon (spredning) er ikke det akustiske signalet som fanges opp av transduseren direkte korresponderende til romladningsdistribusjonen [10]. Amplituden til trykkbølgen som følge av romladninger reduseres gjennom testobjektet. Dempingen er frekvensavhengig og forårsaker høye frekvenskomponenter til å bli mer attenuert enn lavere frekvenser. Som konsekvens av dette, fremstår høyden på de detekterte romladningene som både lavere og bredere sammenlignet med hvordan signalet ville vært i et ideelt materiale uten akustisk impedans. Dess lengre avstand den akustiske bølgen må vandre i mediet, desto mer attenuert og forvrent vil signalet bli.



Figur 2.12: Attenuasjon og dispersjon av akustiske bølger ved PEA-metoden[10].

For å oppnå et riktig estimat på netto romladningsakkumulasjon er kalibrering nødvendig. Kalibrering må gjøres før hvert forsøk på det prøveobjektet som skal analyseres. Et kalibreringssignal utført på et materiale som i utgangspunktet skal være likt, kan føre til feil romladningsfordeling på en annen måleserie, hvis det samme kalibreringssignal blir benyttet[17].

2.6 Måling av ledningsevne

Ledningsevnen til isolasjonsmaterialet er målt etter IEC93 standard[19]. Ledningsevnen beregnes ved å måle polariserings- og depolariseringsstrømmen gjennom testobjektet ved påtrykt DC-spenning.

Ved høyere felt og temperatur oppnås en stabil strøm hurtigere. Ved stabil strøm kan motstanden i isolasjonen antas å være ohmsk:

$$R = \frac{1}{\sigma} \cdot \frac{d}{A} \quad (2.23)$$

hvor d er tykkelsen til testobjektet, og A er arealet til isolasjonen. Ved å kombinere likning 2.23 med Ohms lov kan konduktiviteten som funksjon av påtrykt spenning uttrykkes som:

$$\sigma = \frac{i}{U} \cdot \frac{d}{A} \quad (2.24)$$

Her er i steady-state strømmen gjennom testobjektet og U er påtrykt spenning. Kapasitansen til testobjektet kan uttrykkes som:

$$C = \epsilon_o \epsilon_r \cdot \frac{A}{d} \quad (2.25)$$

Her er ϵ_o permitiviteten i vakuum, ϵ_r er relativ permittivitet til isolasjonsmaterialet, A er arealet til elektrodene og d er tykkelsen til testobjektet. Ved å kombinere likning 2.24 og 2.25 kan konduktiviteten uttrykkes som:

$$\sigma = \frac{1}{U} \cdot \frac{\epsilon_o \epsilon_r}{C} \quad (2.26)$$

Ved likning 2.26 kan konduktiviteten til isolasjonen beregnes på bakgrunn av målinger av polarisering- og depolariseringsstrømmen, påtrykt dc-spenning og kapasitansen.

Kapittel 3

Metodikk

Her følger en beskrivelse av de ulike trinnene ved fremstilling av flate testobjekter av lagdelt isolasjon, klargjøring av miniatyrkabel, måleoppsett for PEA-målinger og fremstilling av koppelobjekter for måling av ledningsevne.

3.1 Fremstilling av lagdelte flateprøver

De flate testobjektene består av lagdelt isolasjon av to forskjellige kryssbundne materialer. Lag 1 består av et HVAC-materiale (LS4201S) som kryssbindes en gang først, før det kryssbindes sammen med lag 2 som består av et HVDC-materiale (LE4253DC15)¹. Fra kabelprodusent ankommer isolasjonsmaterialet i form av pellets. Fra pellets blir materialene ekstrudert til en tynn håndterbar plastfilm. Lag 1 kryssbindes i hydraulisk presse, lag 2 støpes i hydraulisk presse ved lavere trykk og temperatur for å unngå kryssbinding. Deretter blir lag 1 og lag 2 kryssbundet sammen. Etter kryssbindingen blir testobjektet utgasset før elektroder av gull blir pådampet av en ionsputter. Alle trinnene er beskrevet mer inngående nedenfor.

I alle delprosesser er renslighet en avgjørende faktor. Alle prosessene gjøres på laboratorium under sterile forhold da små urenheter i objektene kan være kilde til akkumulasjon av ladninger. Alt utstyr som kan komme i kontakt med materialet rengjøres grundig med isopropanol under flowbenk.

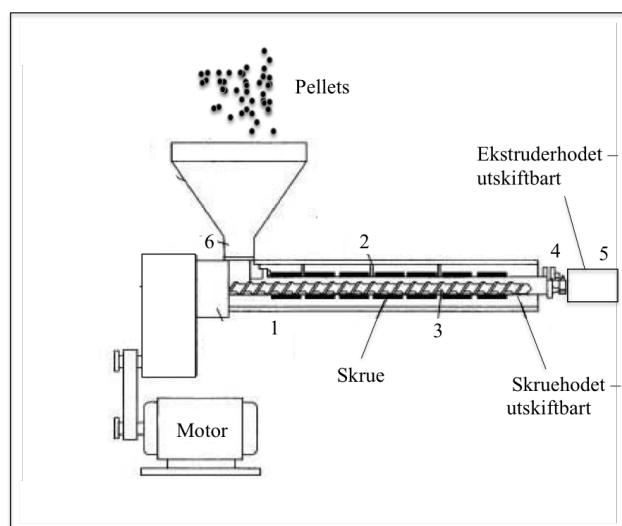
¹I enkelte ekstruderte kabelskjøter vil det ene isolasjonsmaterialet gjennomgå en *dobbel kryssbinding*. Isolasjonen fra kabelen kryssbindes sammen med et nytt isolasjonsmateriale i skjøten[2]. Denne prosessen er forsøkt gjenskapt ved og først kryssbinde lag 1, og deretter kryssbinde lag 1 sammen med lag 2. Årsaken til at to forskjellige materialer er benyttet er for å kartlegge forskjellen mellom AC- og DC-materialet, og eventuelt finne ut hvordan forskjellen i konduktivitet mellom de ulike materialene vil ha en innvirkning på det elektriske feltet.

3.1.1 Ekstrudering

Isolasjonsmateriale av polyetylen oppbevares i pellets som smeltes og formes til ønsket tykkelse av ekstruder. Dette utføres for å unngå hulrom, ujevnheter og redusere forurensing i materialet.

Ekstruderens virkemåte er skissert i figur 3.1. Pellets blir matet inn i ekstruderen gjennom en trakt. En roterende skrue transporterer materialet videre gjennom sylindren. Materialet blir varmet opp av varmelementene og det mekaniske arbeidet som utføres av skruen. Avstandene mellom gjengene på den roterende skruen reduseres langs sylindren. Det resulterer i økende trykk og reduksjon av hulromdannelse i materialet. Ved ekstruderens utløp blir plastmaterialet formet til ønsket tykkelse av ekstruderhodet.

Tynn plastfilm blir ekstrudert til fremstilling av flate testobjekt, og tykkere plasttape blir ekstrudert til fremstilling av koppobjekter. I hver av prosessene benyttes egnet skrue- og ekstruderhode. Dette sikrer riktig trykk under ekstruderingsprosessen.



Figur 3.1: Prinsipiell skisse av ekstruderen[20]. Tilsvarende ekstruder ble brukt i forsøket til å ekstrudere pellets til plastfilm.

Ekstruderen er delt opp i seks temperatursoner. Temperaturinnstillingene som er benyttet, kan ses i tabel 3.1. Før ekstruderingen settes i gang må de ulike delene til ekstruderen rengjøres. Hodet til ekstruderen må demonteres og rengjøres med isopropanol og kobberbørste. Forvarming på rundt en time er en forutsetning for å oppnå jevn temperatur på alle sonene. Under ekstrudering skal den roterende skruen ha en rotasjon på 14 rpm, trykket ved endestykket vil da være på rundt 140 bar.

I utgangen av ekstruderen former ekstruderhodet materiale til ønsket tykkelse. For fremstillingen av tynn plastfilm sørger en vannkjølt valse for at filmen opp-

Tabell 3.1: Temperaturinnstilling på de seks sonene på ekstruderen.

Sone	Temperatur [°C]
1	117
2	117
3	117
4	117
5	117
6	17

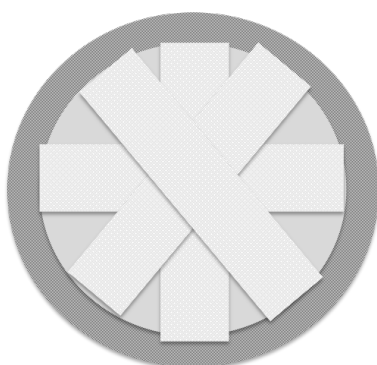
rettholder ønsket form i det den blir nedkjølt. Dette oppnås ved at valsen roterer i en hastighet marginalt høyere enn hastigheten til skruen.

For fremstillingen av tykkere plasttape justeres valsen på tilsvarende måte for å oppnå ønsket form. På grunn av tykkelsen til tapen blir materiale kuttet opp i staver på ca. 50 cm som pakkes inn aluminiumsfolie. Den første meteren av det ferdig ekstruderte materialet forkastes for å minimere urenheter som har oppstått i begynnelsen av ekstruderingsprosessen.

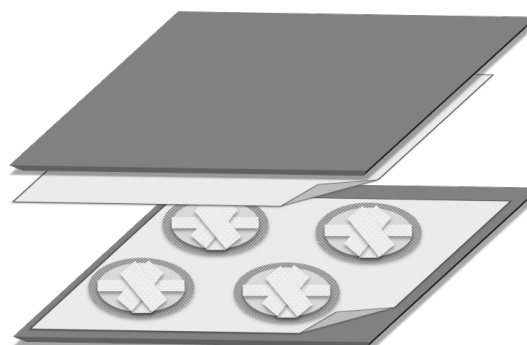
Etter bruk rengjøres ekstruderen ved å tilsette rensepellets, og det kjøres samme program som for ekstrudering av materialet. Restene som avsettes er lettere å fjerne som følge av en mykere konsistens enn polyetylen. De enkelte delene som har vært i kontakt med materialet, blir så rengjort med kobberbørste og isopropanol.

3.1.2 Støping og kryssbinding

Den ferdige plastfilmen klippes i strimler på ca. 1 cm og veies opp til 2,5 gram per testobjekt før de fordeles jevnt i støpeformer. Støpeformene har diamanter på 7.5 cm, og shims med tykkelse 1,75 mm benyttes for å oppnå en tykkelse på 0,25 mm.



(a) Støpeform



(b) Metallplater

Figur 3.2: Plaststrimler fordeles jevnt i støpeformer mellom to metall plater. Deretter blir testobjektene støpt og/eller kryssbundet i en hydraulisk presse.

Før pressing er støpeformene plassert mellom to metallplater. Tykk plastfilm er plassert mellom støpeformene og metallplatene for å forhindre direkte kontakt mellom testobjektet og metallet. Det gjøres for å begrense urenheter og fysiske skader under kryssbindingen, i tillegg forenkler det prosessen med å løsne objektene fra støpeformene.

Pressen forvarmes til 120°C. Innstillingene til forvarming av støping av objekter er vist i tabell 3.2 og innstillinger for kryssbindingsprosessen er vist i tabell 3.3.

Tabell 3.2: Program for støping av testobjekter uten kryssbinding.

Innstilling	Trykk [tonn]	Temperatur [°C]	Tid [min]
Lavt trykk	3,5	120	10
Høyt trykk	25	120	2
Vannkjøling	25	Av	12

Tabell 3.3: Program for kryssbindingsprosessen.

Innstilling	Trykk [tonn]	Temperatur [°C]	Tid [min]
Lavt trykk	3,5	118	10
Høyt trykk	25	170	40
Vannkjøling	25	Av	18

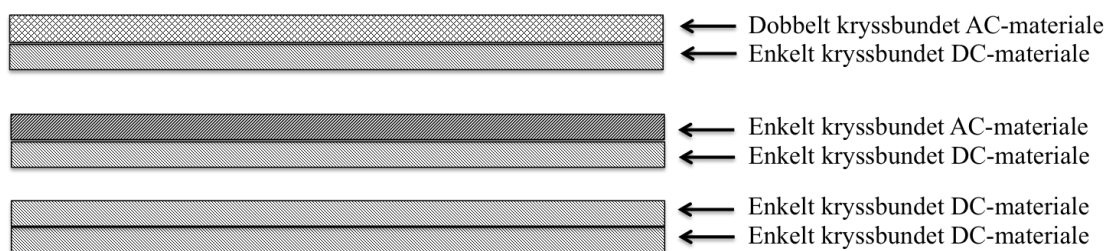
3.1.3 Kryssbinding av lagdelte testobjekter

Lag 1 bestående av AC-materiale kryssbindes først som beskrevet i avsnitt 3.1.2 og tabell 3.3. Lag 2 bestående av DC-materialet støpes som beskrevet i avsnitt 3.1.2 og tabell 3.2. Deretter kryssbindes materialene sammen ved å plassere lagene i en sandwichstruktur i støpeformene. Shims med tykkelse på 1,6 mm plasseres under formene og programmet i tabell 3.3 kjøres en ytterligere gang.

Fremstilling av lagdelte testobjekter som referansemålinger

Som en sekundært del av testarbeidet har det blitt fremstilt lagdelte testobjekter der AC- og DC-materialet er støpt hver for seg, og deretter kryssbundet sammen. I tillegg til lagdelte testobjekter bestående av DC-materialer som er støpt hver for seg, og deretter kryssbundet sammen².

²Formålet er å kartlegge hvilken effekt dobbeltkryssbinding har på romladningsformasjon, og hvilken effekt som kan skyldes konduktivitetforskjeller.



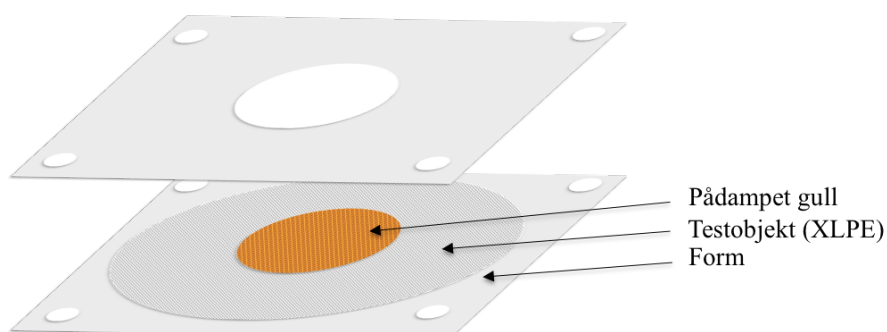
Figur 3.3: Flate lagdelte testobjekter i sandwichstruktur.

3.1.4 Utgassing

De kryssbundne testobjektene blir plassert i varmeskap til utluftning i tre dager. Varmeskapet innstilles til 90°C og atmosfærisk trykk. Utgassingene reduserer uønskede restgasser og antioksidanter som kan være kilder til akkumulasjon av romladning.

3.1.5 Ionesputting - gull

Siste trinn er påføring av gullelektrode. Dette gjøres ved hjelp av en ionesputter. Testobjektene blir plassert i en plastform med åpning i sentrum på begge sider slik at gullelektroden kun blir påført i sentrum av testobjektet. Plastformen blir så plassert i ionesputteren. Prosessen utføres 5 minutter på hver side av testobjektet med en DC-spenning på 1200 V og strømstyrke på 5 mA. For å oppnå riktig strømstyrke må vakuemet være riktig. Det er viktig å påse at strømmen og dermed temperaturen ikke blir for høy da det kan deformere prøven og dermed gi utslag på prøvene.



Figur 3.4: Plastform for pådamping av gullelektrode. Testobjektet plasseres i en plastform slik at kun en sirkulær del av testobjektet blir pådampt et tynt lag med gull på hver side.

3.2 Fremstilling av koppobjekter

Spesialegnede former for støping av Rogowskikopper rengjøres grundig med isopropanol under flowbenk. Deretter påføres fire lag med slippmiddelet Frekote 55-NC. Hvert lag påføres med ca. 5 minutters mellomrom. De ferdig ekstruderte plaststavene (se avsnitt 3.1.1) varmes opp i varmeskap før de kuttet opp i tabletter ved hjelp av en hydraulisk stanse. I hver form tilsettes en tablett, og små rester fra stansingen plasseres langs kantene av formen. Tabletten vil da utgjøre bunnen av koppen og de mindre bitene vil utgjøre veggene. Totalt vil mengden plastmateriale i hver form være i overkant av 28 gram.

Shims med tykkelse 2,7 mm benyttes for å oppnå en ønsket tykkelse på 0,5 mm på bunnen av koppene. Formene plasseres mellom to stålplater i pressen med en tykk plastfilm over og under formene som beskyttelse mot metallplatene.

I første del av kryssbindingsprosessen blir koppene smeltet under trykk (se tabell 3.5).

I andre delen av programmet blir koppene kryssbundet (se tabell 3.5). Koppene blir så plassert i varmeskap for avspenning. Avspenningen foregår ved 170°C frem til koppene blir transparente. Koppene utgasses deretter i tre døgn ved 90°C (se avsnitt 3.1.4).

Tabell 3.4: Program for kryssbindingsprosessen del 1 - koppobjekter.

Innstilling	Trykk [tonn]	Temperatur [°C]	Tid [min]
Lavt trykk	3,5	117	45
Høyt trykk	25	117	5
Vannkjøling	25	Av	13

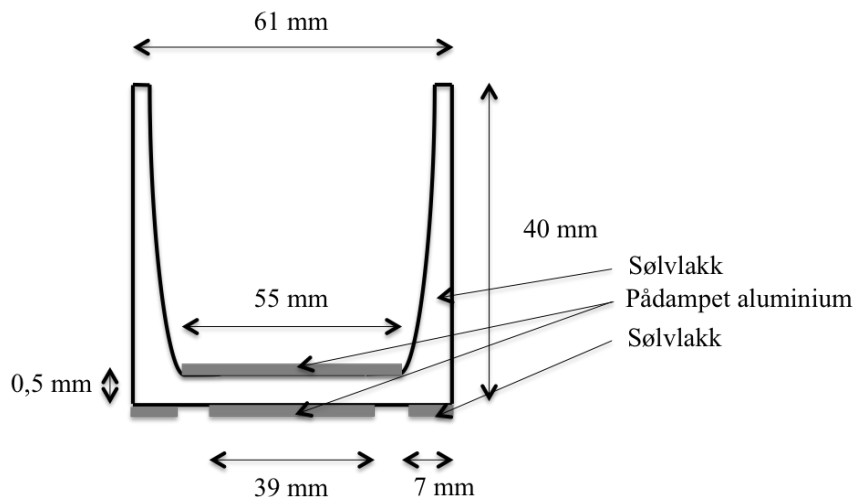
Tabell 3.5: Program for kryssbindingsprosessen del 2 - koppobjekter.

Innstilling	Trykk [tonn]	Temperatur [°C]	Tid [min]
Lavt trykk	3,5	170	45 sec
Høyt trykk	25	170	42
Vannkjøling	25	Av	15

3.2.1 Pådamping av aluminium

Pådamping av aluminiumselektrode utføres på bunnen av Rogowskikoppene på over- og undersiden. Alt bortsett fra det aktuelle området tildekkes slik at kun det aktuelle området skissert i figur 3.5 blir aluminiumsbelagt. Koppene plasseres på et stativ skjermet med aluminium for å hindre at glasskolben blir aluminiumsbelagt.

Etter pådampingen pensles en sølvlakk på kanten av undersidene av koppene. Søvlakken fungerer som en *guard* for å eliminere krepstrøm langs sidene av koppene under konduktivitetstesting.



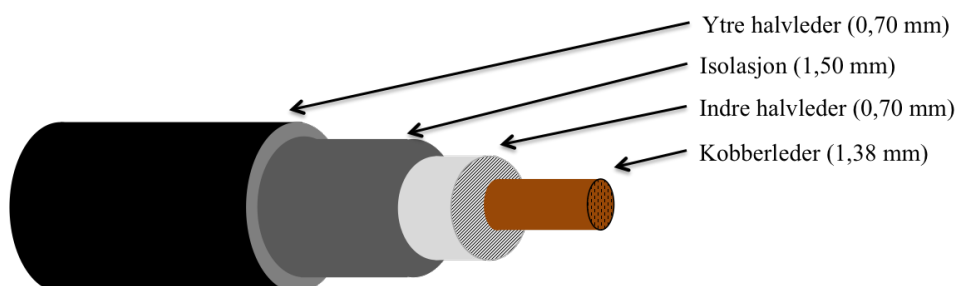
Figur 3.5: Pådampning av aluminium på Rogowskikopp.

3.3 Modifikasjon av miniatyrkabel

Miniatyrkabelen er levert ferdig ekstrudert og kryssbundet fra produsent. En modifisering gjøres for å tilpasse miniatyrkabelen til måleoppsettet. I tabell 3.6 følger en beskrivelse av kabelen.

Tabell 3.6: Spesifikasjon av miniatyrkabel [21].

Komponent	Beskrivelse	Tykkelse [mm]	Ytre diameter [mm]
Leder	kobberleder (1,5 mm ²)	1,38	1,38
Indre halvleder	LE0550	0,70	2,78
Isolasjon	PEX, LE4253	1,50	5,78
Ytre halvleder	LE0550	0,70	7,18

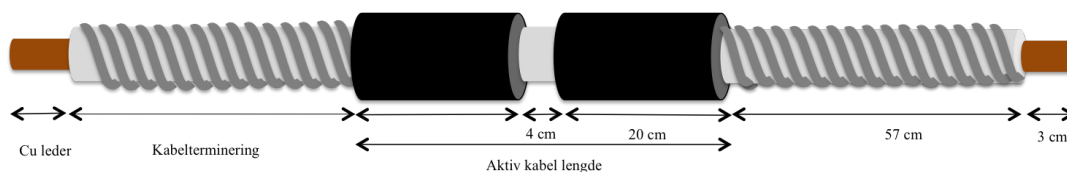


Figur 3.6: Oppbygging og tykkelse på bestanddelene av miniatyrkabelen.

Miniatyrkabelen kappes til en lengde på 164 cm. Fra hvert endestykke og innover kabelen blir 60 cm av ytre halvleder fjernet med skrellemaskin. For å oppnå en jevn feltfordeling og unngå overslag på termineringene blir elektrisk feltkontrollerende tape viklet rundt avskrellet område.

Den elektrisk feltkontrollerende tapen er strimlet opp i en sammenhengende lengde med bredde på ca. 2 mm og avstand på ca. 2 mm mellom hver vikling.

På midten av kabelen fjernes 4 cm av ytre halvleder med finkornet sandpapir for å skille den potensielle ledningen mellom kapasistansene i kabelen og hindre overslag ved påtrykt puls. Dimensjonene på kabelen kan ses i figur 3.7.



Figur 3.7: Ferdig modifisert miniatyrkabel klar for måling. Figuren viser lengden til endetermineringene og halvlederområdet.

3.4 Måleoppsett

Måleutstyret som benyttes i denne rapporten er *TechImp Pulsed Electro-acoustic* (PEA) nærmere beskrevet i teorien avsnitt 2.5. Måleutstyret blir styrt av programmet *LabVIEW* som foretar et forhåndsinnstilt antall målinger i et gitt tidsintervall³. Rådataene fra *LabVIEW* blir videre bearbeidet i Matlab. Før måleserien startes må systemet kalibreres. Kalibrering er nødvendig for å oppnå et riktig estimat på netto romladningsakkumulasjon. Dette er nærmere beskrevet i teorien avsnitt 2.5.2. Sensitivitetsgrensen på måleutstyret er $0,1 \text{ C/m}^3$.

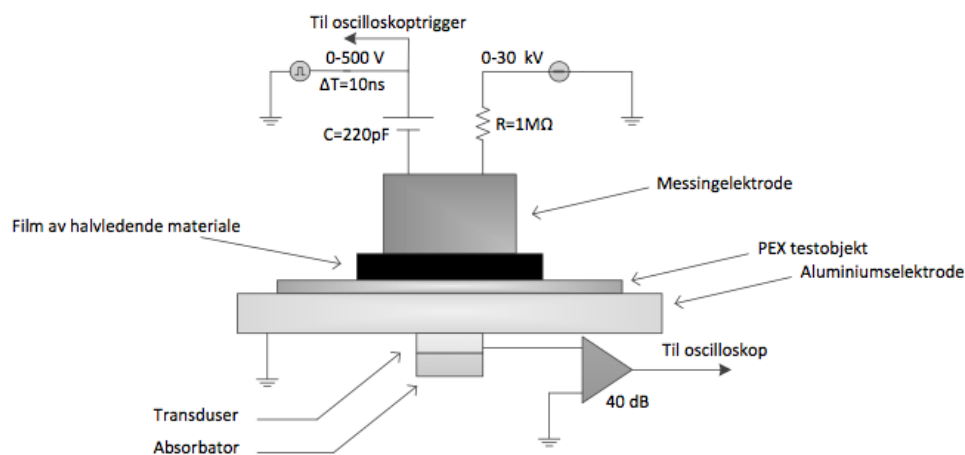
3.4.1 Flate testobjekt

Måleoppsettet som benyttes til flateprøvene er vist i figur 3.8. Måleutstyret består av en piezoelektrisk måleenhet og en pulsgenerator. Pulsgeneratoren genererer en puls på 0 - 500V med en pulslengde på 10 ns og en frekvens på 150Hz. Måleenheten er plassert inne i et Faradays bur, og består av en nedre aluminiumselektrode (katode) og en halvleder festet til en messingelektrode(anode)[22].

Før testobjektet blir plassert i målecellen, rengjøres innsiden av målecellen med isopropanol. Deretter påføres en tynn film med silikon i sentrum av aluminiumselektroden, og på hver side av halvledermaterialet som er i kontakt med messingelektroden. Dette sikrer god akustisk kontakt mellom testobjekt og elektrode. Med

³(se vedlegg A.2)

testobjektet plassert mellom elektrodene kan øvre elektrode skrues til med en momentnøkkel innstilt på 25 Nm. Måleutstyret er koblet til en DC-spenningskilde, et oscilloskop og en datamaskin. DC-spenningskilden kan levere en spenning på 0-30 kV[22].

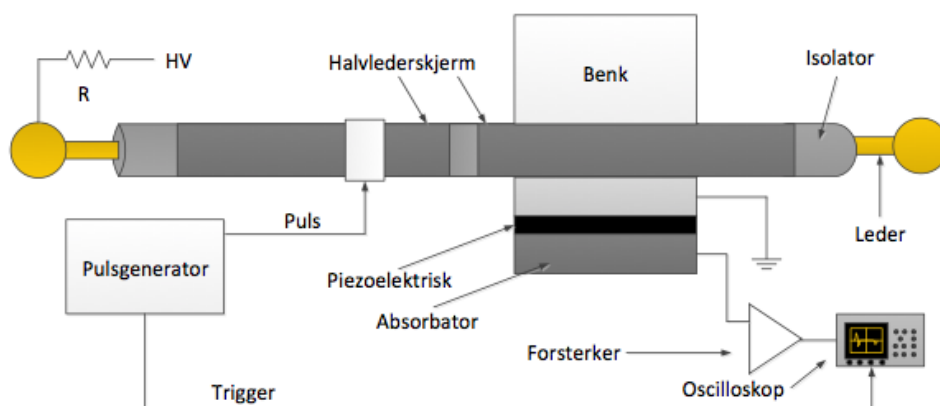


Figur 3.8: Skjematisk oppsett av TechImp PEA for flate testobjekt[22]

Kalibrering gjøres ved å ta fem målinger ved ± 5 kV.

3.4.2 Miniaturkabler

Måleoppsettet som benyttes for miniaturkabler er vist skjematisk i figur 3.9. Måleoppsettet består av en pulsgenerator og piezoelektrisk måleenhet. Måleenheten er plassert i et Faradays bur for å begrense støy fra omgivelsene. Målecellen rengjøres med isopropanol før en liten dråpe silikonfett fordeles jevnt i sporet på nedre aluminiumselektrode. Miniaturkabelen monteres med pulsgenerator og målecelle direkte koblet til halvlederskjerm. Det er viktig å påse at minst mulig hulrom oppstår mellom kabel og nedre elektrode på målecellen. Lav klemmekraft vil føre til lavere akustisk kontakt og være kilde til målestøy[15]. En DC-spenningskilde i serie med en motstand er koblet til lederen i det ene endestykket. DC-spenningskilden leverer en spenning på 0-50 kV. På motsatt endestykke monteres en koronarings for å redusere feltgradienten.



Figur 3.9: Skjematisk oppsett av TechImp PEA kabelsystem[23]

Før måleseriene igangsettes må systemet kalibreres. Det gjøres ved å ta fem målinger i *LabVIEW* på henholdsvis ± 0 , $\pm 17,5$, ± 25 kV. En referansemåling på 0 kV foretas dagen etter, rett før oppstart av måleserien. Dette gjøres for å justere for blant annet små forskyvninger av testobjektet og gjenværende romladninger etter påtrykt spenning.

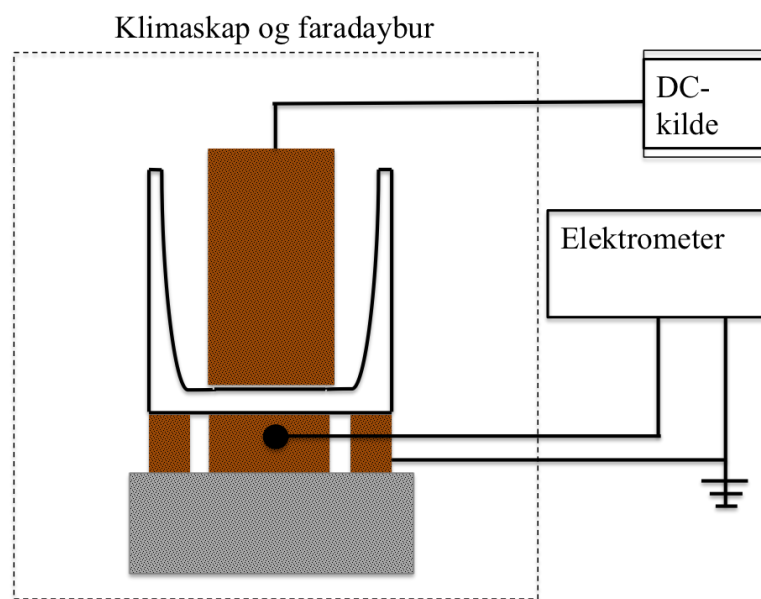
3.4.3 Måling av ledningsevne

Ledningsevnen til kryssbundet polyetylen er temperatur- og feltavhengig. For å oppnå en første approksimasjon av ledningsevnen har måling av ledningsevne blitt utført ved tre ulike temperaturer og spenninger.

Måleoppsettet er skissert i figur 3.10. En DC-kilde er koblet til testobjektets øvre aluminiumselektrode gjennom en kobberlektrode. Tilsvarende er aluminiumselektroden på testobjektets underside koblet til et elektrometer gjennom en kobberlektrode.

Guarden er koblet til jord for å hindre kryptstrøm. Sidene til koppen skal hindre overslag mellom øvre og nedre elektrode.

Måleutstyret blir styrt av *LabVIEW* som foretar et forhåndsinnstilt antall målinger. Ved måling av ledningsevnen til isolasjonsmaterialet ble det utført én time med kontinuerlig støymåling, én time med kontinuerlig måling av polariseringsstrøm og 10 timer av depolariseringsstrøm.



Figur 3.10: Måleoppsett for måling av ledningsevne i koppobjekter. Rogowskikoppen er koblet til DC-spenningskilde og elektrometer i et klimaskap. *Guarden* er koblet til jord for å hindre kryptstrøm.

Kapittel 4

Resultat

Denne oppgaven har som formål å kartlegge romladningsformasjonen og den korresponderende elektriske feltutviklingen i flate testobjekt med lagdelt isolasjon og miniatyrkabel med kryssbundet DC-materiale.

I det videre arbeidet med kartlegging av romladningsformasjon og årsakene til akkumulasjonen, er ledningsevnen til DC-materialet målt og sammenlignet med blant annet ledningsevnen til AC-materialet¹. Resultatene vil bli presentert i følgende rekkefølge:

- (i) Flate testobjekt av lagdelt isolasjon
- (ii) Miniatyrkabler bestående av DC-materiale
- (iii) Ledningsevnen til DC-materialet.

4.1 Flate testobjekter av lagdelt isolasjon

Kabelskjøter i ekstruderte HVDC-kabler vil i enkelte områder bestå av et området som er kryssbundet under produksjon og deretter kryssbundet sammen med et annet isolasjonsmateriale i det aktuelle skjøteområdet. I forsøk på å gjenspeile dette området i et PEA-oppsett er flate testobjekt bestående av et kryssbundet AC-materialet, kryssbundet sammen med et DC-materiale. I første omgang har det blitt benyttet to forskjellige materialer for å få større utslag i målingene.

Som en sekundært del av testarbeidet har det blitt utført PEA-målinger på flate testobjekt bestående av lagdelt isolasjon av enkelt kryssbundet AC- og DC-materiale og lagdelt isolasjon av enkelt kryssbundet DC-materiale. Resultatene fra disse referansemålingene er presentert i slutten av kapittelet i avsnitt 4.1.2.

Romladningsprofilene og det korresponderende elektriske feltet over isolasjonen er vist ved *voltage-on* og *voltage-off*. Grenseflatene til elektrodene er markert

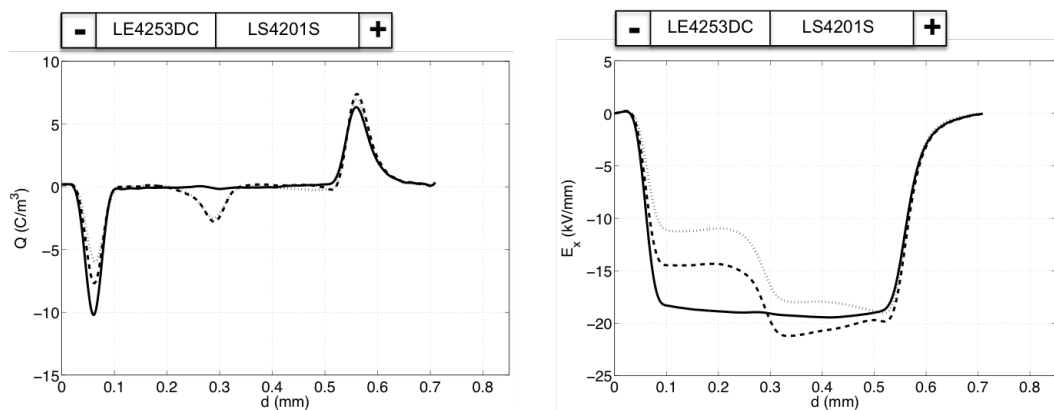
¹Ledningsevnen til AC-materialet er tidligere målt i en masteroppgave[24].

etter amplitudetoppene ved *voltage-on* og kan avvike mellom testobjektene.

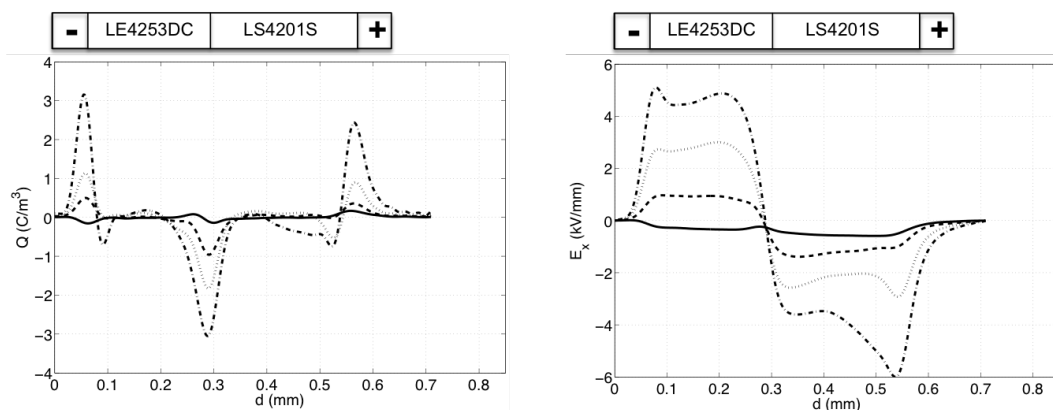
Grenseflaten mellom isolasjonslagene er markert over figurene sammen med markeringen av lag bestående av DC-materiale og lag bestående av AC-materiale. Anode er markert med '+' og katode er markert med '-'. Markering av grenseflatene og elektrodene er ment å være veiledende og skal gjøre det enklere å følge beskrivelsen av resultatene.

Nedenfor følger et eksempel på hvordan resultatene er presentert. Romladningsformasjonen ved *voltage-on* viser to typer ladninger ved grenseflaten til elektrodene: den påtrykte DC-spenningen og induerte ladninger detektert i bulk (speilladninger). I bulk kan momentane og langsomme ladninger observeres. De momentane ladningene vil forsvinne i *voltage-off* målingene. Feltutviklingen ved *voltage-on* viser romladningenes direkte innvirkning på det elektriske feltet ved polarisering. *Voltage-off* målingene viser de gjenværende akkumulerte ladningene og ladningenes nettobidrag på det elektriske feltet.

I beskrivelsen av resultatene er lagdelt isolasjon bestående av LE4253DC betegnet lag-dc og lagdelt isolasjon bestående av LS4201S betegnet lag-ac.



(a) Voltage-on profilene viser det reelle bildet av hvordan romladningene vil påvirke feltet under drift.



(b) Voltage-off viser de gjenværende ladningene ved kortslutning, og ladningenes nettobidrag på det elektriske feltet.

(c) Voltage-on og voltage-off

4.1.1 Lagdelte testobjekter av AC- og DC-materiale

Nedenfor presenteres romladningsprofilene og korresponderende elektrisk feltutvikling til flate testobjekt av lagdelt isolasjon bestående av tidligere kryssbundet AC-materiale, kryssbundet sammen med DC-materiale.

Forsøkene har blitt utført ved elektrisk snittfelt på 20 kV/mm, 30 kV/mm og 40 kV/mm. Ved 20 kV/mm og 30 kV/mm har flere måleserier blitt utført for å undersøke reproduserbarheten.

Tabell 4.1: Oversikt over testobjektens tykkelse, gjennomsnittlige feltstyrke og varighet på måleserie. Gjennomsnittlig felt er beregnet ved likning (2.1) og er basert på testobjektets estimerte tykkelse.

Testobjekt	#1	#2	#3	#4	#5
Estimert tykkelse [mm]	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
Målt tykkelse [mm]	0,45	0,46	0,45	0,47	0,45
Påtrykt DC-spenning [kV]	10	10	15	15	20
Gjennomsnittlig feltfordeling [kV/mm]	20	20	30	30	40
Måleserie [døgn]	16	11	18	5	15

Måleserie #2 og #4 er kortere enn de øvrige måleseriene som følge av at målingene er utført for å kontrollere reproduserbarheten. De er derfor terminert etter at en tydelig trend er observert.

4.1.1.1 Testobjekt #1 (20 kV/mm)

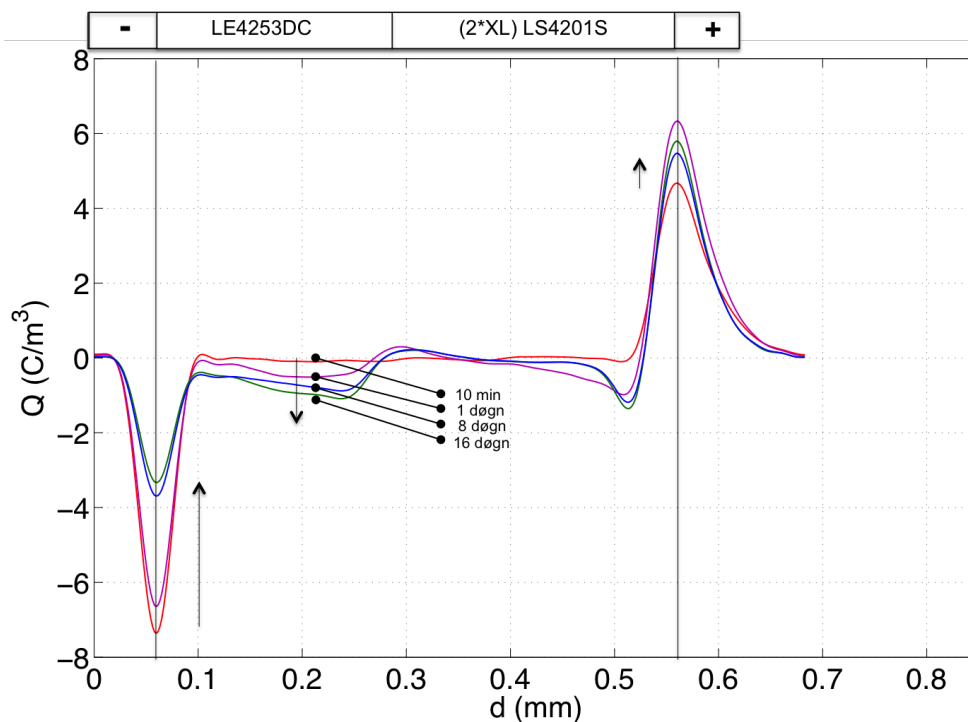
Romladningsfordeling

Figur 4.2 viser romladningsfordelingen ved påtrykt felt. Etter 10 min er kun elektrodetoppene tydelige. Etter ett døgn og frem mot det 16. døgnet er akkumuleringen av negative ladninger markant². Ved elektrodene kan ladningene som er indusert i bulk og i grenseflaten til elektrodene observeres. Betydelig reduksjon av amplitudetoppen ved katoden og økning ved anoden. I bulk mot anoden observeres en akkumulering av negative ladninger.

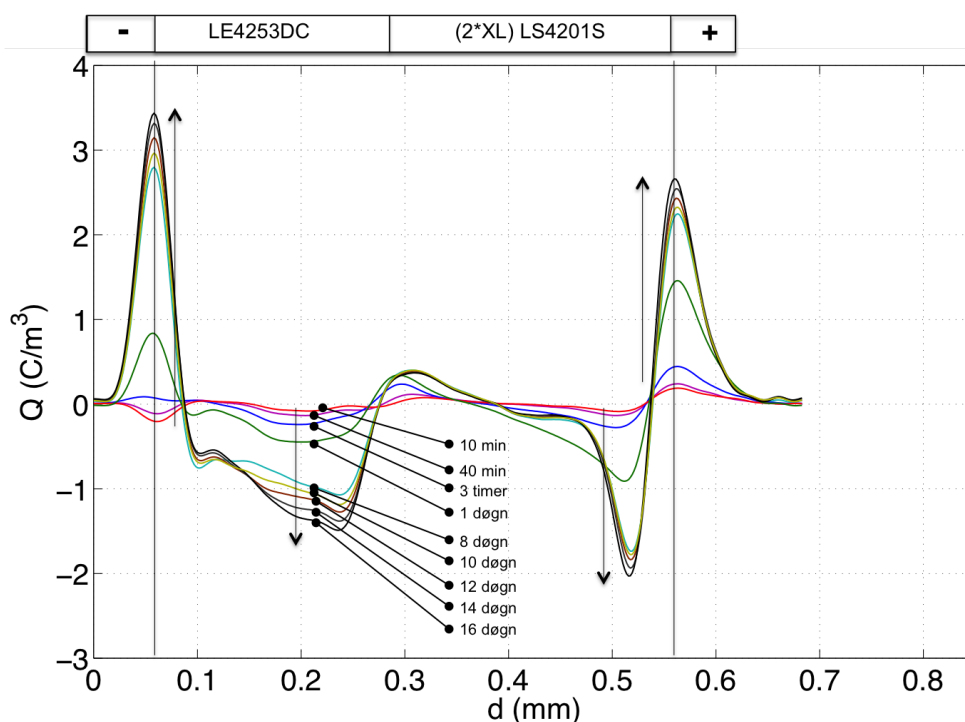
Figur 4.3 viser romladningsfordelingen når spenningen er avslått. Ved elektrodene kan en utvikling av homoladninger observeres i begynnelsen av måleserien. Deretter reversering og akkumulering av heteroladninger ved katoden. Denne utviklingen fortsetter gjennom måleserien. Et toppunkt på 3,4 C/m³ oppnås etter 16 døgn. En stor andel av ladningene kan tilskrives induserte speilladninger fra bulk i testobjektet. I tillegg kan en mindre del av ladningene være akkumulerte

²En signalfeil i LabView førte til at utviklingen av romladninger i tidsrommet fra 1 døgn til det 8. døgnet ikke ble registrert. Utviklingen etter det 8. døgnet viser allikevel en tydelig trend.

heteroladninger. Fra bulk i lag-dc mot grenseflaten til lag-ac kan en betydelig akkumulasjon av negative ladninger observeres. Utviklingen forsetter gjennom hele måleseriens varighet med avtagende hastighet og når en toppverdi etter 16 døgn ($-1,5 \text{ C/m}^3$). I dielektrisk grenseflate i lag-dc kan en mindre antydning til positive ladninger observeres ($0,4 \text{ C/m}^3$). I nærhet av anoden akkumuleres negative romladninger hurtig fra 10 min til det 8. døgnet. Deretter stabiliseres utviklingen ved -2 C/m^3 . Ved grenseflaten til anoden kan en utvikling av homoladninger observeres. Utviklingen foregår hurtig frem mot det 8. døgnet ($-2,6 \text{ C/m}^3$).



Figur 4.2: Utviklingen av romladninger ved påtrykt gjennomsnittsfelt 20 kV/mm (voltage-on).



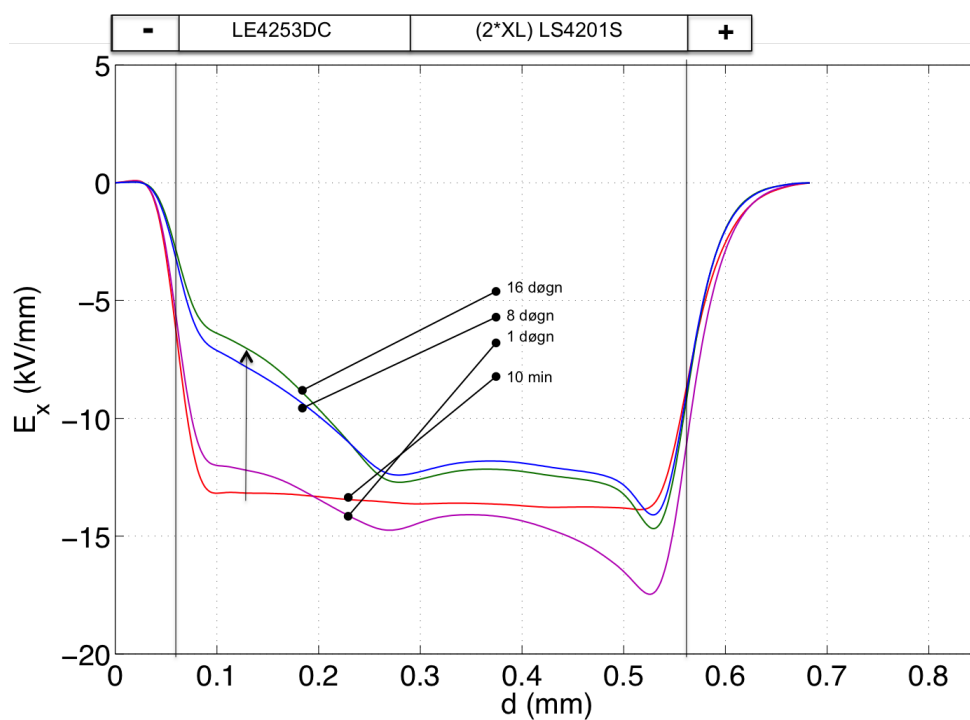
Figur 4.3: Akkumulerte romladninger ved voltage-off (20 kV/mm).

Feltutvikling

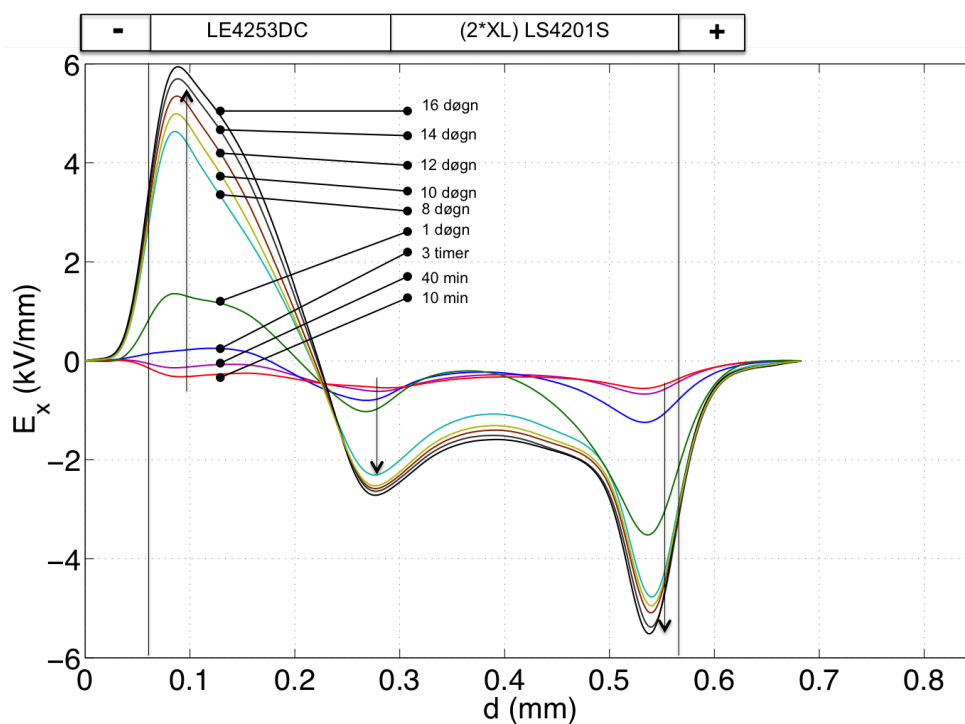
Figur 4.4 viser romladningenes innvirkning på det elektriske feltet ved polarisering. Feltet reduseres ved katoden som følge av en markant nettoakkumulasjon av homoladninger i lag-dc. Fra grenseflate lag-dc/lag-ac er feltet tilnærmet konstant frem mot anoden der heteroladningene fører til en mindre feltøkning.

Figur 4.5 viser romladningenes nettobidrag på det elektriske feltet. Feltutviklingen ved katoden viser en antydning til feltøkning de første 10 min, deretter reverserer utviklingen. Feltet reduseres frem mot 16 døgn (6 kV/mm) som følge av en betydelig nettoakkumulasjon av homoladninger. Ved grenseflaten lag-dc/lag-ac øker feltet fra 40 min til 16 døgn (-6 kV/mm), fra grenseflaten mot bulk i retning anoden reduseres feltet før det forsterkes kraftig ved anoden (- 5,7 kV/mm) som følge av nettoakkumulasjon av heteroladninger.

Maksimal feltforsterkning ved anoden er på 28,5 % og maksimal feltreduksjon ved katoden er på 30 %.



Figur 4.4: Feltutvikling ved 20 kV/mm (voltage-on).



Figur 4.5: Feltutvikling ved 20 kV/mm (voltage-off).

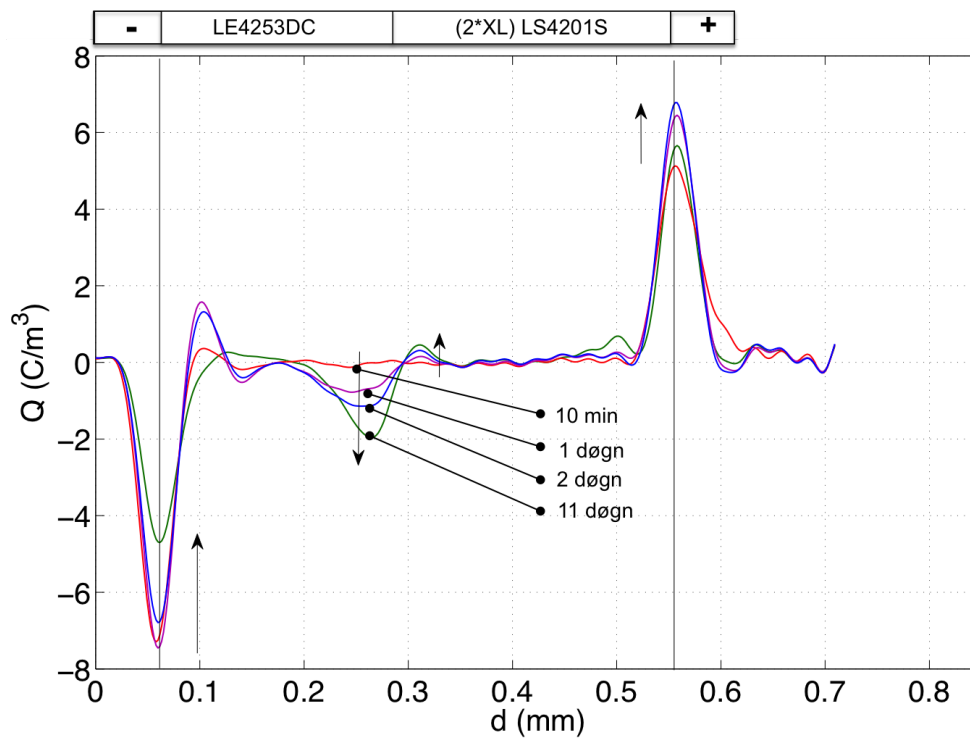
4.1.1.2 Testobjekt #2 (20 kV/mm)

Romladningsfordeling

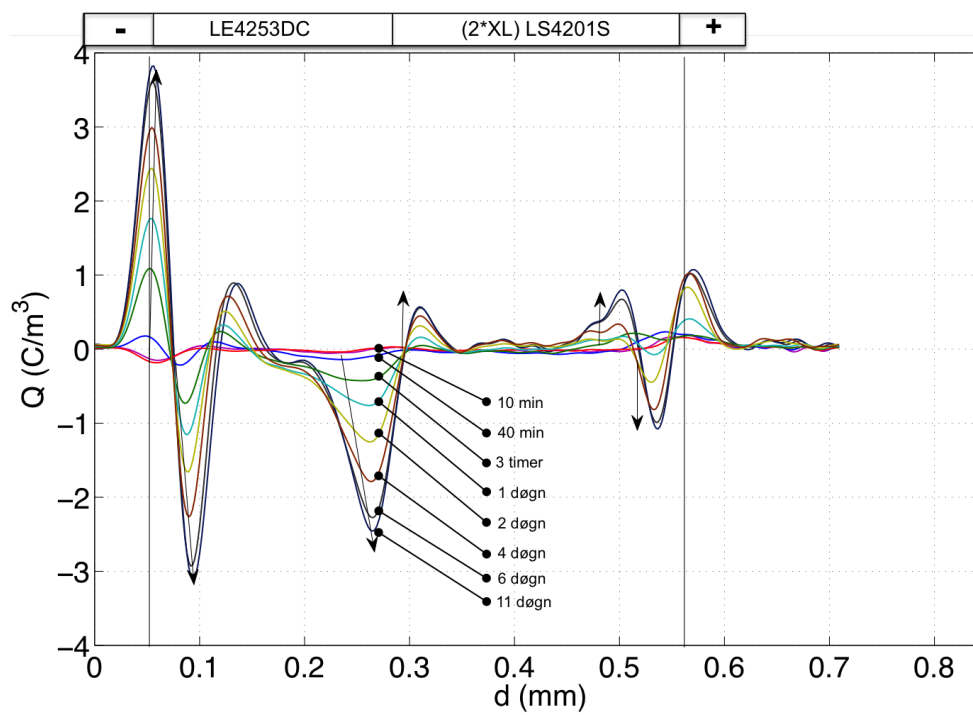
Figur 4.6 viser romladningsfordelingen ved påtrykt elektrisk felt. Et markant skille kan observeres etter ett døgn i grenseflaten lag-dc/lag-ac. Utviklingen av negative ladninger er jevnt fordelt fra bulk i lag-dc frem mot dielektrisk grenseflate. Utviklingen fortsetter frem mot det 16. døgnet. Ved dielektrisk grenseflate i lag-ac kan en antydning til positive ladninger observeres.

Figur 4.7 viser utviklingen ved voltage-off. I grenseflaten ved katoden akkumuleres homoladninger i begynnelsen av måleserien, deretter reverseres utviklingen mot en akkumulasjon av heteroladninger. Reverseringen observeres etter 40 min og fortsetter frem mot det 11. døgnet ($3,8 \text{ C/m}^3$). I nærhet av katoden i lag-dc er utviklingen av homoladninger analog med utviklingen av heteroladninger ved katoden og når en toppverdi etter 11 døgn på -3 C/m^3 .

I bulk i lag-dc kan en utvikling av positive ladninger observeres (1 C/m^3). I nærheten av den dielektriske grenseflaten i lag-dc kan en konsentrert utvikling av negative ladninger observeres. Utviklingen fortsetter frem mot det 11. døgnet ($-2,5 \text{ C/m}^3$). Ved den dielektriske grenseflaten i lag-ac kan en vesentlig mindre akkumulasjon av positive ladninger observeres ($0,6 \text{ C/m}^3$). I nærhet av anoden utvikles homoladninger, og i umiddelbar nærhet til anoden utvikles heteroladninger. Det er langt flere lokale soner med utvikling av romladning. Generelt er utviklingen observert i dette testobjektet svært ulik de andre testobjektene som er undersøkt. Årsaken vil bli drøftet i diskusjonen.



Figur 4.6: Utviklingen av romladninger ved påtrykt gjennomsnittsfelt 20 kV/mm (voltage-on).

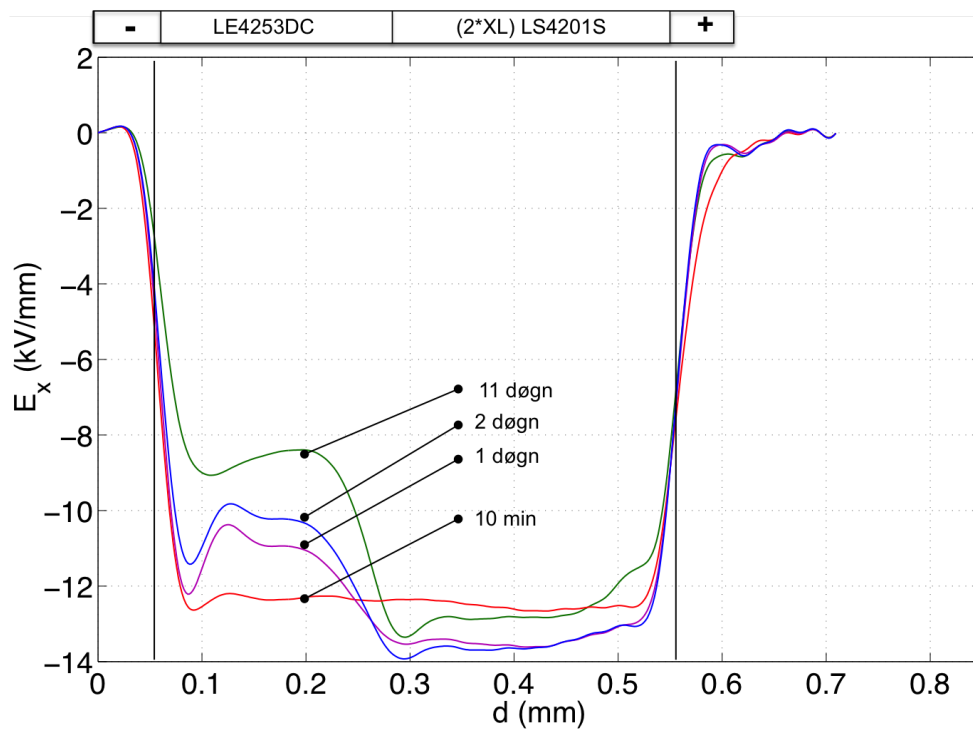


Figur 4.7: Akkumulerte romladninger ved voltage-off (20 kV/mm).

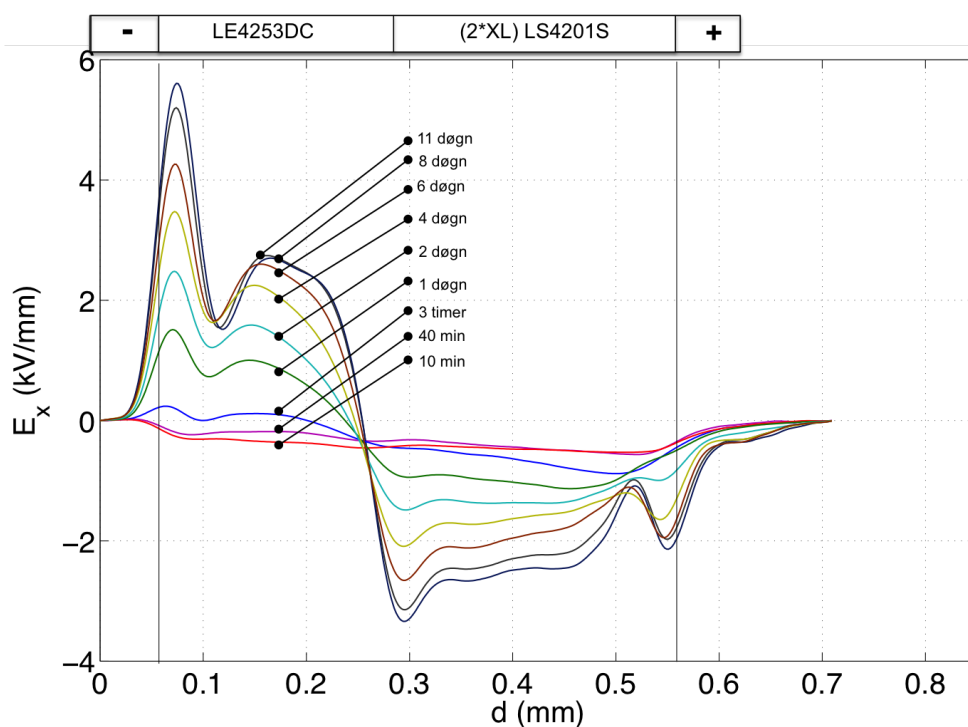
Feltutvikling

Figur 4.8 viser romladningenes innvirkning på det elektriske feltet ved polarisering. Fra 10 min frem mot 2 døgn reduseres feltet betydelig fra katode mot dielektrisk grenseflate. Feltreduksjonen skyldes en nettoakkumulasjon av homoladninger i det aktuelle området. I lag-ac kan en feltøkning observeres.

Maksimal feltreduksjon observeres ved katoden på 29 % av påtrykt felt (se figur 4.9) og maksimal feltøkning ved dielektrisk grenseflate på 16 % av påtrykt felt.



Figur 4.8: Feltutvikling ved 20 kV/mm (voltage-on).



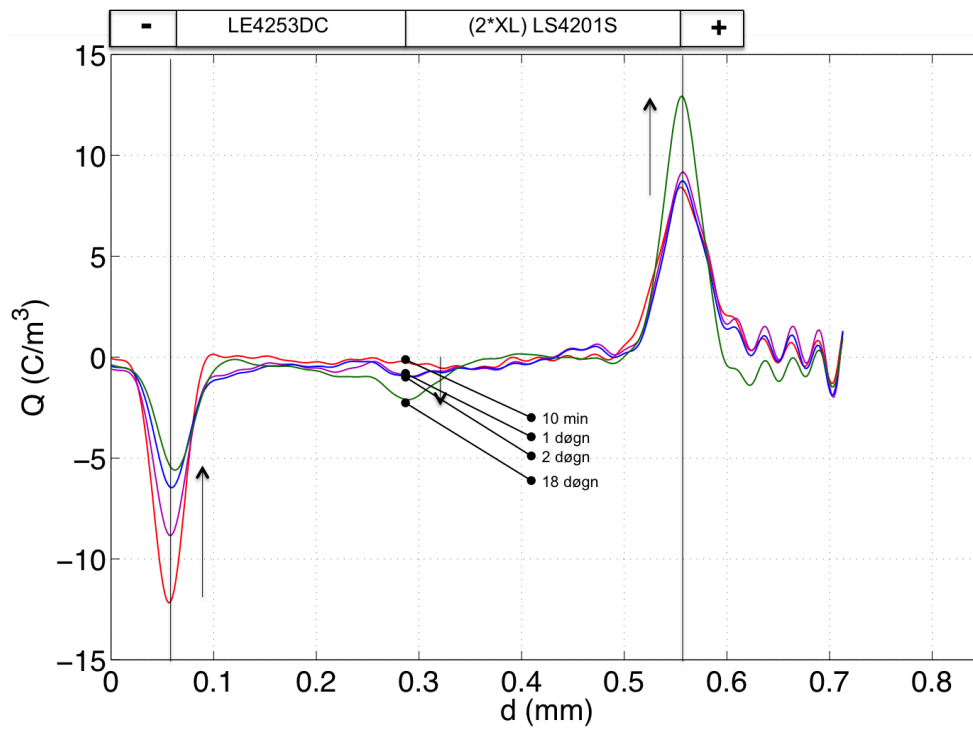
Figur 4.9: Feltutvikling ved 20 kV/mm (voltage-off).

4.1.1.3 Testobjekt #3 (30 kV/mm)

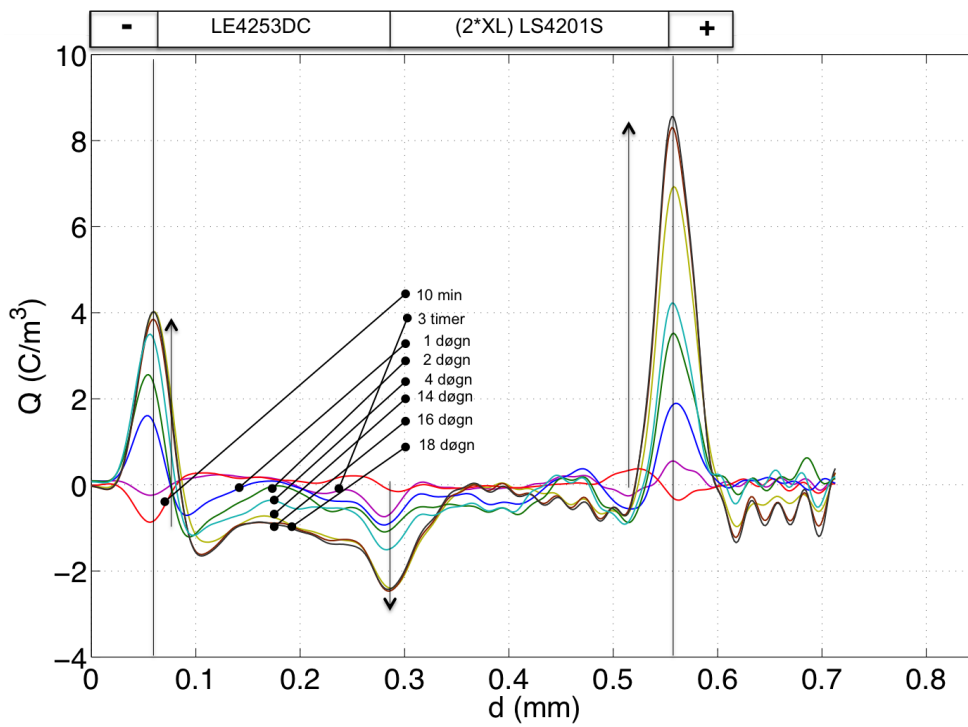
Romladningsfordeling

Figur 4.10 viser romladningsfordelingen ved påtrykt felt. Fra det 1. døgnet og frem mot det 18. døgnet kan akkumulasjon av negative ladninger i dielektrisk grenseflate observeres. Ved katoden reduseres amplitudetoppen, og ved anoden øker amplitudetoppen.

Figur 4.11 viser utviklingen ved voltage-off. Antydning til homoladninger ved elektrodene i begynnelsen av måleserien. Deretter reversering og utvikling av heteroladninger ved katoden frem mot det 18. døgnet (4 C/m^3). Fra bulk mot dielektrisk grenseflate i lag-dc utvikles negative ladninger. Utviklingen stabiliseres etter 14 døgn ($-2,2 \text{ C/m}^3$). Ved anoden akkumuleres homoladninger frem til det 16. døgnet, deretter stabiliseres utviklingen på 8 C/m^3 .



Figur 4.10: Utviklingen av romladninger ved påtrykt gjennomsnittsfelt 30 kV/mm (voltage-on).

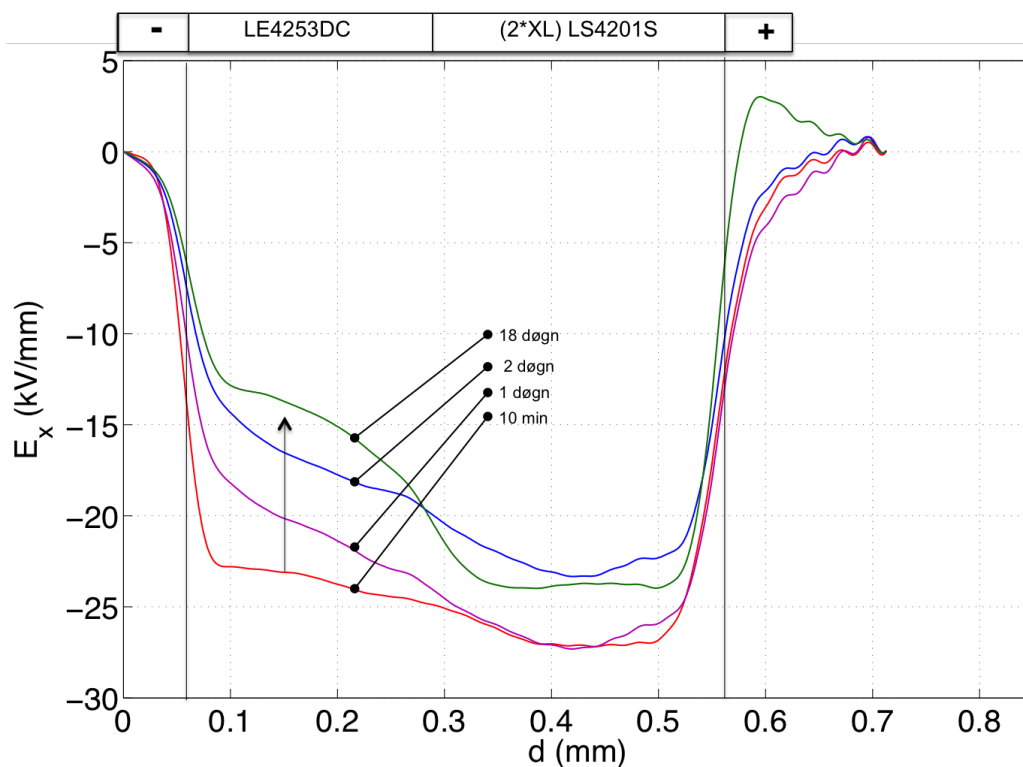


Figur 4.11: Akkumulerte romladninger ved voltage-off (30 kV/mm).

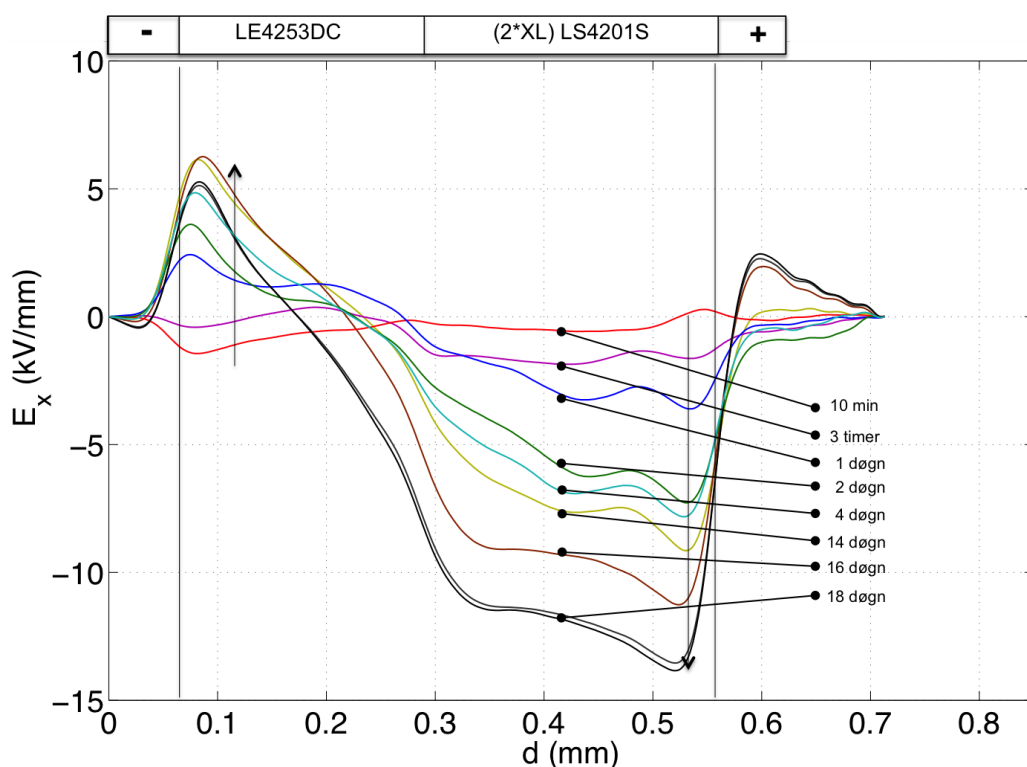
Feltutvikling

Figur 4.12 viser ladningenes innvirkning på det elektriske feltet ved påtrykt elektrisk felt. Feltet reduseres over hele isolasjonen fra 10 min frem mot to døgn. Reduksjonen er sterkest ved katoden. Ved dielektrisk grenseflate mot anoden øker feltet fra to døgn frem mot 18 døgn, og tilbake til sine opprinnelige verdi ved 10 min.

Figur 4.13 viser feltet ved voltage-off. Feltet øker betydelig ved anoden, og en mindre økning ved katoden. Maksimal feltøkning i nærhet av anoden på $\sim 47\%$, maksimal feltreduksjon i nærhet av katoden på $\sim 23\%$. Kalibreringsresponsen til testobjekt #3 er preget av litt høyere støy enn de øvrige testobjektene (se kalibreringssignal A.6 i vedlegg), og kan tildels forklare den høye feltforsterkningen ved anoden som ikke er observert i de øvrige testobjektene.



Figur 4.12: Feltutvikling ved 30 kV/mm (voltage-on).



Figur 4.13: Feltutvikling ved 30 kV/mm (voltage-off).

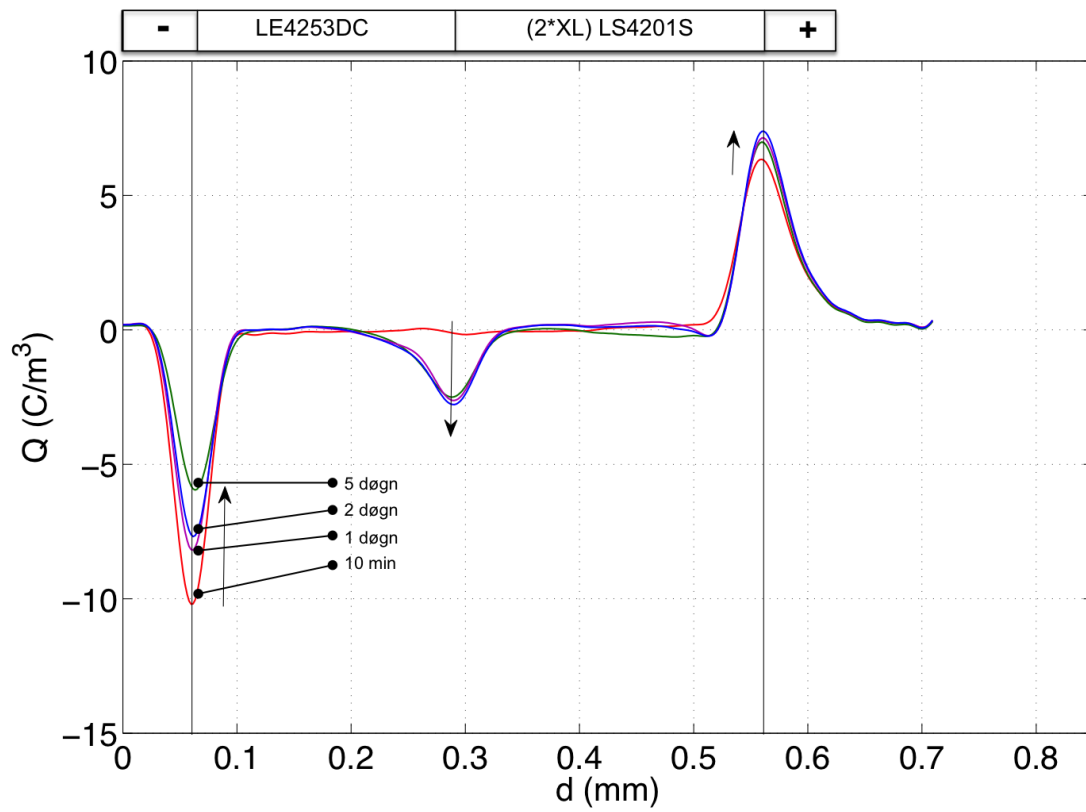
4.1.1.4 Testobjekt #4 (30 kV/mm)

Romladningsfordeling

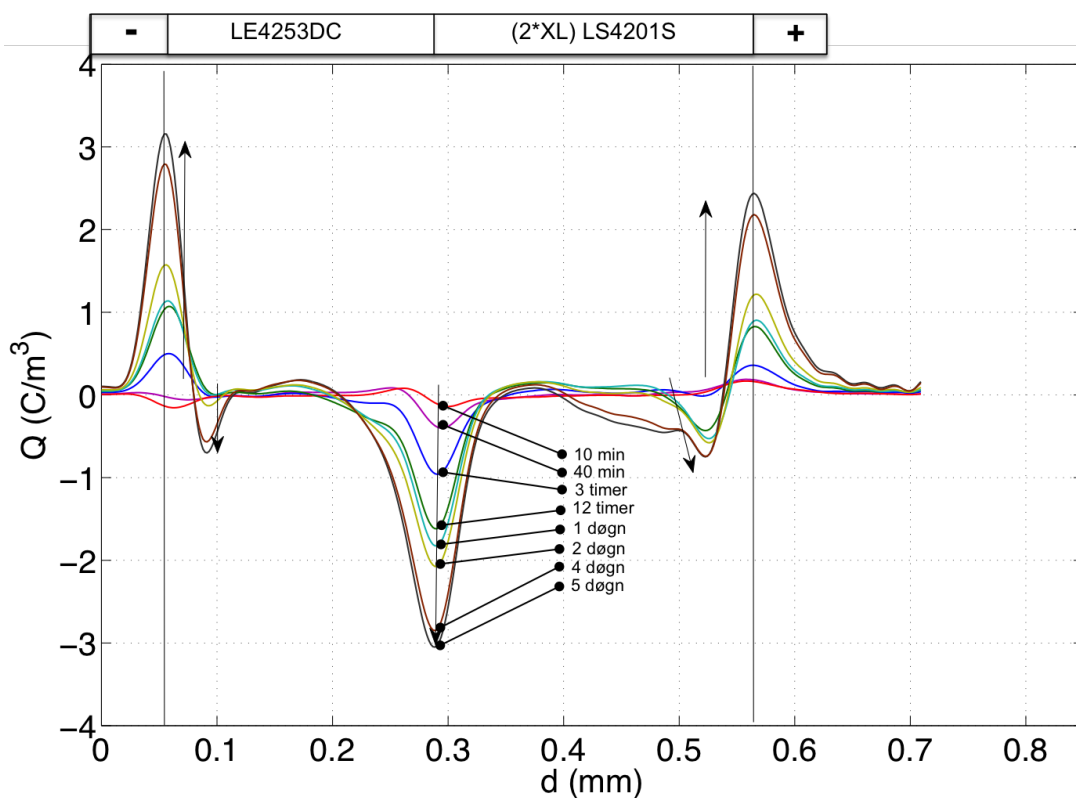
Figur 4.14 viser romladningsfordelingen ved påtrykt felt. Etter 10 min er kun elektrodene synlige. Fra 10 min frem mot ett døgn kan en markant grenseflate mellom lag-dc/lag-ac observeres som følge av akkumulasjon av negative ladninger.

Figur 4.15 viser romladningsfordelingen ved voltage-off. Ved grenseflaten til katoden akkumuleres homoladninger i begynnelsen av måleserien, deretter reverseres utviklingen og en opphopning av heteroladninger kan observeres. Utviklingen fortsetter gjennom måleserien frem til fem døgn (3 C/m^3). I nærhet av katoden observeres en antydning til homoladninger ($-0,7 \text{ C/m}^3$). Ved dielektrisk grenseflate kan en betydelig akkumulasjon av negative ladninger observeres.

Utviklingen fortsetter frem mot det 5. døgnet til -3 C/m^3 . Frem mot det 5. døgnet utvikles homoladninger ved katoden til $2,4 \text{ C/m}^3$ og i nærhet av katoden utvikles heteroladninger ($-0,7 \text{ C/m}^3$).



Figur 4.14: Utviklingen av romladninger ved påtrykt gjennomsnittsfelt 30 kV/mm (voltage on).

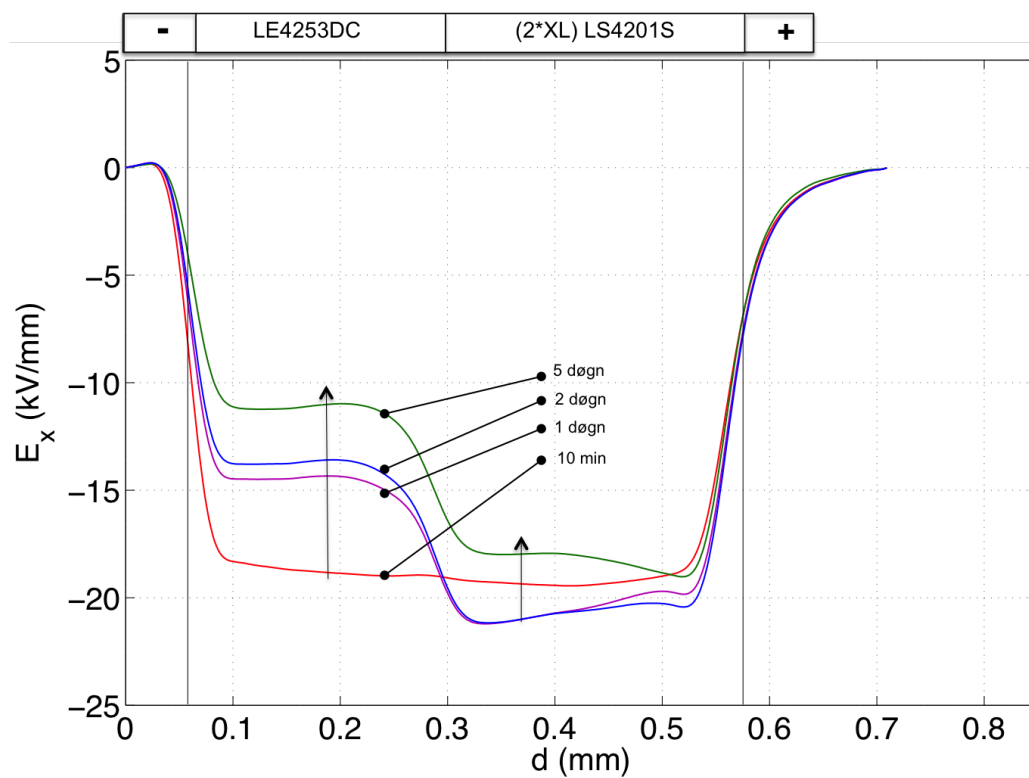


Figur 4.15: Akkumulerte romladninger ved voltage-off (30 kV/mm).

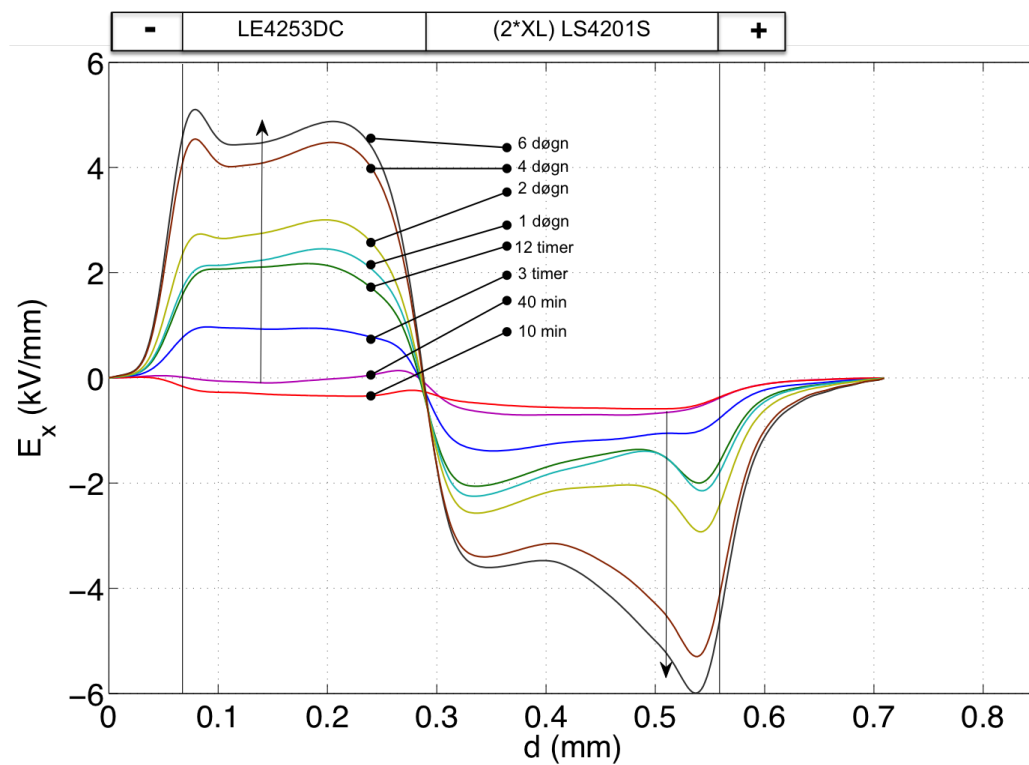
Feltutvikling

Figur 4.16 viser ladningenes innvirkning på det elektriske feltet ved påtrykt elektrisk felt. Det elektriske feltet reduseres betydelig ved katoden frem mot dielektrisk grenseflate. Forårsaket av en mindre opphopning av homoladninger ved katoden og en betydelig opphopning av negative ladninger ved dielektrisk grenseflate (se figur 4.16). Ved anoden mot dielektrisk grenseflate øker feltet grunnet utvikling av heteroladninger ved grenseflaten mot anoden.

Figur 4.17 viser feltet ved voltage-off. Maksimal feltøkning oppstår i lag-ac i nærheten av anoden på 20 % av påtrykt gjennomsnittsfelt. I lag-dc er feltet relativt jevnt fordelt med feltreduksjon på $\sim 26\%$.



Figur 4.16: Feltutvikling ved 30 kV/mm (voltage-on).



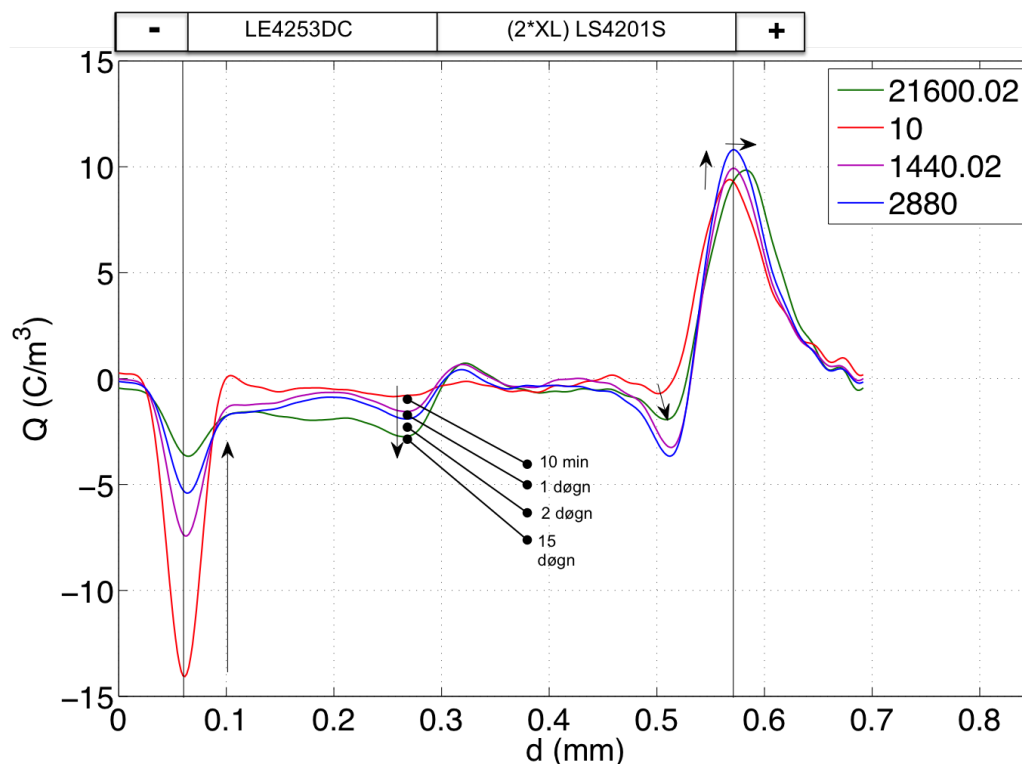
Figur 4.17: Feltutvikling ved 30 kV/mm (voltage-off).

4.1.1.5 Testobjekt #5 (40 kV/mm)

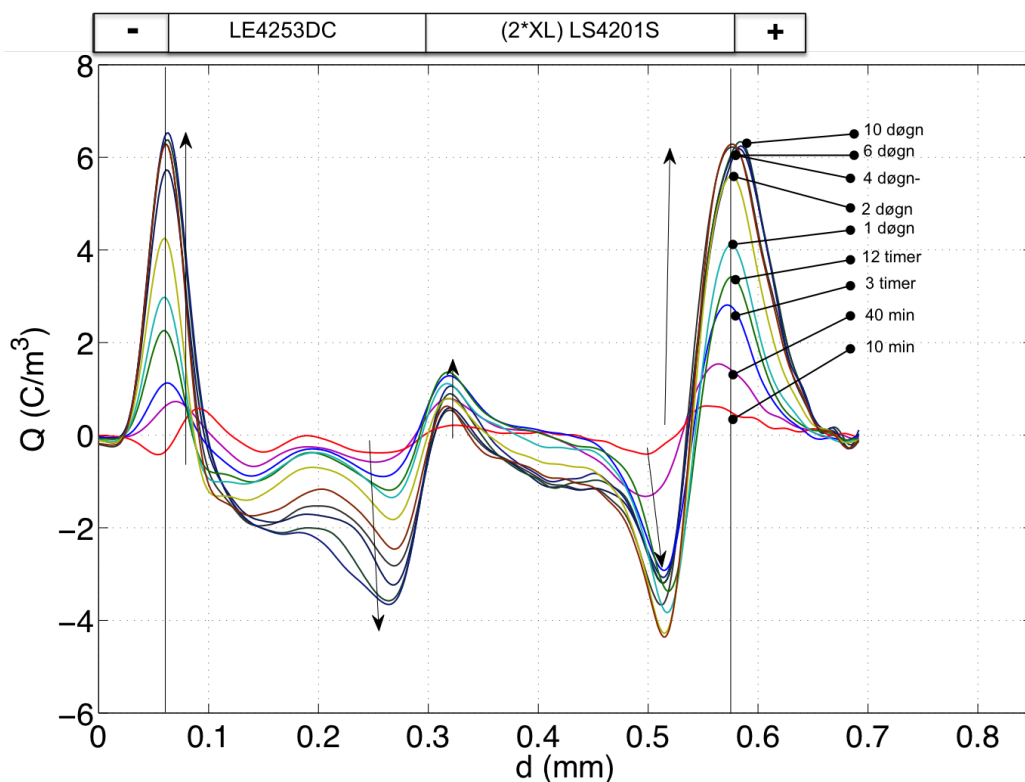
Romladningsfordeling

Ved katoden reduseres amplitudetoppen i takt med reverseringen og opphopningen av heteroladninger (se figur 4.18). Fra katode mot grenseflaten akkumuleres negative ladninger. I nærheten av anoden kan en akkumulasjon av negative ladninger observeres. Akkumulasjonen av negative ladninger når sitt maksimum etter etter to døgn. En antydning til opphopning av positive ladninger ved anoden.

Figur 4.19 viser romladningsfordelingen ved voltage-off. En reversering fra homoladninger til sterk opphopning av heteroladninger kan observeres i grenseflaten til katoden. Utviklingen stabiliseres mellom 6 til 10 døgn ($6,3 \text{ C/m}^3$). Fra katoden frem mot den dielektriske grenseflaten i lag-dc akkumuleres homoladninger jevnt gjennom hele måleserien til et maksimum ($-3,7 \text{ C/m}^3$). Ved dielektriske grenseflate i lag-ac kan en økning av positive ladninger observeres ($1,7 \text{ C/m}^3$). Fra dielektrisk grenseflate i lag-ac mot anoden akkumuleres negative ladninger gjennom hele måleserien. Opphopningen er størst i umiddelbar nærhet av anoden ($-4,2 \text{ C/m}^3$). I grenseflaten til elektroden kan en betydelig akkumulasjon av homoladninger observeres. Utviklingen stabiliseres etter 8 døgn på 6 C/m^3 .



Figur 4.18: Utviklingen av romladninger ved påtrykt gjennomsnittsfelt 40 kV/mm (voltage on).

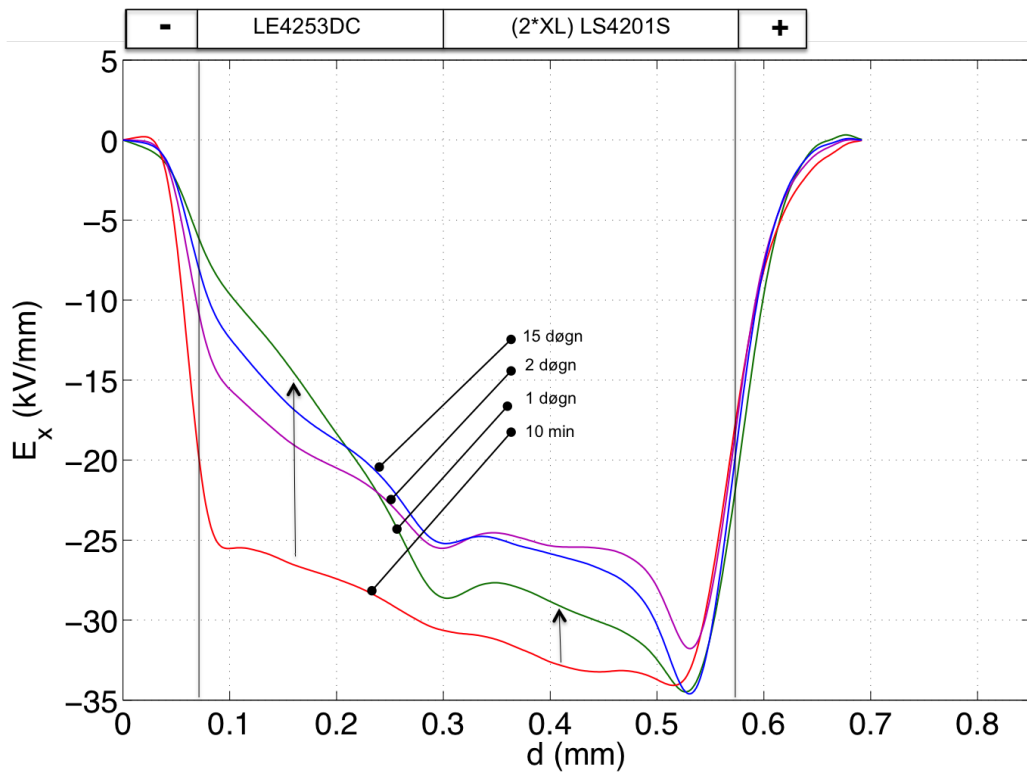


Figur 4.19: Akkumulerte romladninger ved voltage-off (40 kV/mm).

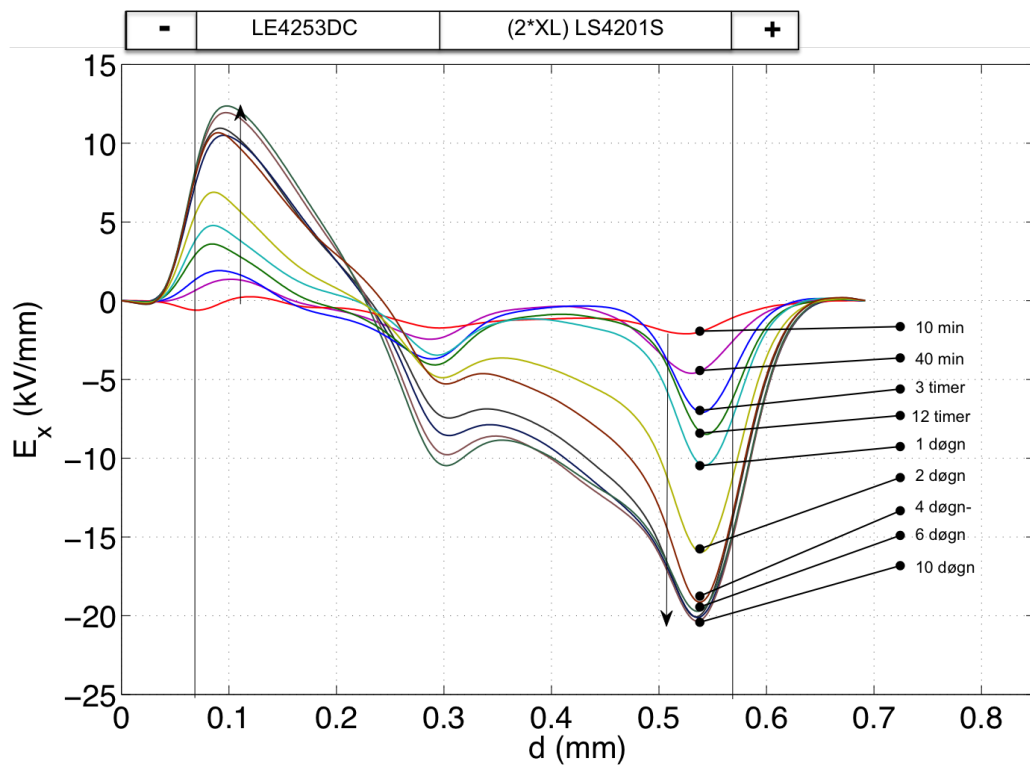
Feltutvikling

Figur 4.20 viser romladningenes innvirkning på det elektriske feltet ved polarisering. Frem mot ett døgn reduseres feltet kraftig ved katoden og i store deler av bulk frem mot anoden (se fig. 4.20). Ved anoden kan en antydning til feltøkning observeres.

Figur 4.21 viser romladningenes nettobidrag på det elektriske feltet. Akkumuleringen av homoladninger ved katoden fører til en feltreduksjon på 30 %. Nettoladningsakkumulasjon av heteroladninger ved anoden fører til en feltøkning på 50 %.



Figur 4.20: Feltutvikling ved 40 kV/mm (voltage-on).



Figur 4.21: Feltutvikling ved 40 kV/mm (voltage-off).

4.1.2 Effekten av dobbel kryssbinding mot enkelkryssbinding i lagdelt isolasjon

Testobjekter #1-5 har bestått av lagdelt isolasjon der et AC-materiale først er kryssbundet én gang, deretter kryssbundet sammen med et DC-materiale. Nedenfor har det blitt utført målinger av romladningsformasjonen av lagdelt isolasjon der AC- og DC-materialet kryssbindes sammen uten tidligere å ha vært kryssbundet, og lagdelt isolasjon der to identiske DC-materialer kryssbindes sammen.

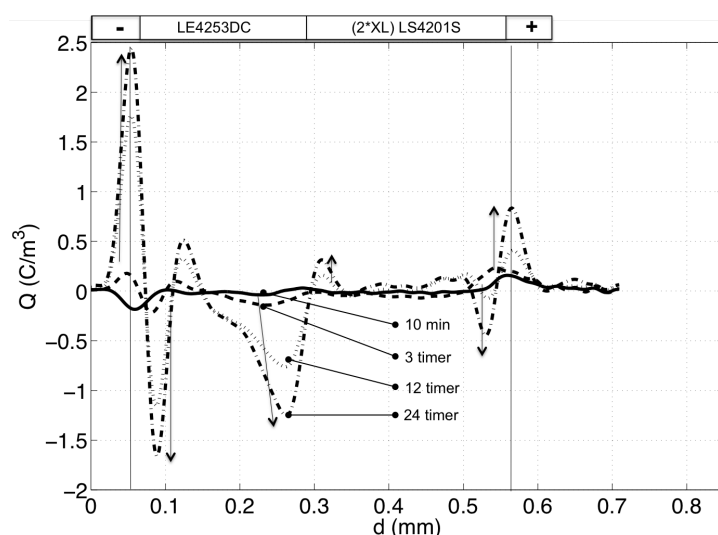
Nedenfor følger en sammenligning av romladningsformasjonen i flate testobjekter av lagdelt isolasjon bestående av:

- (i) Dobbelt kryssbundet AC-materiale (LS4201S) og kryssbundet DC-materiale (LE4253DC15).
- (ii) Kryssbundet AC-materiale (LS4201S) og kryssbundet DC-materiale (LE4253DC15).
- (iii) Kryssbundet DC-materiale (LE4253DC15).

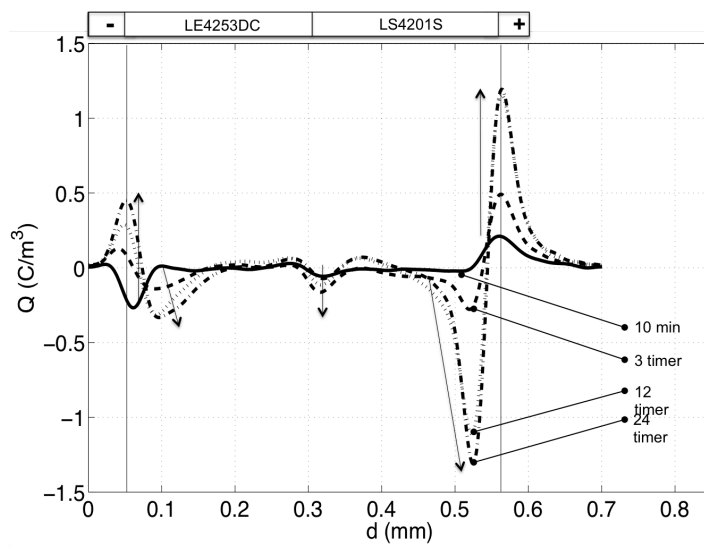
Et snittfelt på 20 kV/mm er påtrykt testobjektene over en periode på 24 timer. Her vist ved voltage-off.

Romladningsformasjonen i figurene 4.22, 4.23 og 4.24 viser tydelig effekten av dobbel kryssbinding. Ved dobbel kryssbinding kan en vesentlig akkumulasjon av ladninger observeres mellom isolasjonslagene. Effekten er betydelig større sammenlignet med (ii) i figur 4.23 og (iii) i figur 4.24 .

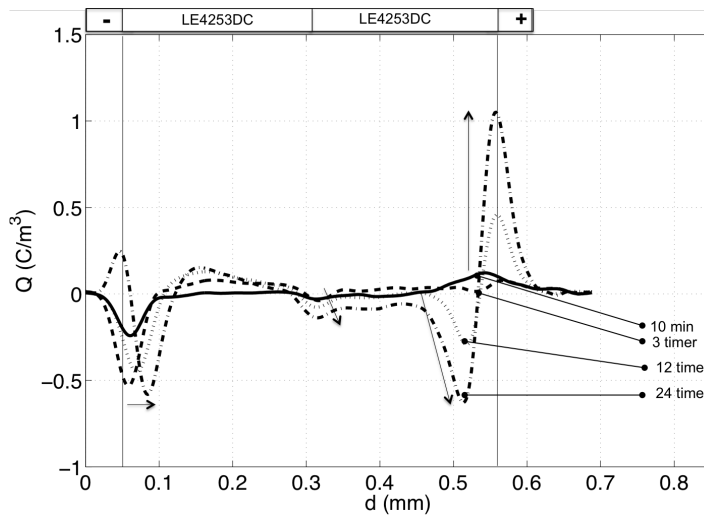
Disse resultatene kan sannsynliggjøre andre årsaker enn kun materialenes ulike konduktivitet som årsak til akkumulering av ladninger i grenseflaten.



Figur 4.22: Lagdelt testobjekt bestående av dobbelt kryssbundet LS4201S (venstre) og enkelt kryssbundet LE4253DC15 (høyre side). Tydelig akkumulering av romladninger i grenseflaten kan observeres.



Figur 4.23: Lagdelt testobjekt bestående av enkelt kryssbundet LS4201S (venstre) og enkelt kryssbundet LE4253DC15 (høyre). En mindre utvikling av negative ladninger i grenseflaten kan observeres.



Figur 4.24: Lagdelt testobjekt bestående av enkelt kryssbundet LE4253DC15. Antydning til en grenseflate med negative ladninger på anodesiden kan observeres.

4.2 Miniaturkabel bestående av DC-materiale

Kartlegging av romladningsformasjon og den korresponderende elektriske feltutviklingen har blitt utført på miniaturkabler bestående kryssbundet HVDC-isolasjon. PEA-målinger har blitt utført ved påtrykt felt 20, 30 og 40 kV/mm.

Tabell 4.2: Oversikt over påtrykt spenning, indre og ytre radielle feltstyrke og gjennomsnittlig feltstyrke.

Miniaturkabel	#M1	#M2	#M3
Påtrykt DC-spenning [kV]	30	45	60
Radiell elektrisk feltstyrke r_{indre} [kV/mm]	29,1	43,6	58,1
Radiell elektrisk feltstyrke r_{ytre} [kV/mm]	14,0	21,0	27,9
Gjennomsnittlig påtrykt felt [kV/mm]	20	30	40
Tidsintervall [dager]	-	9	18

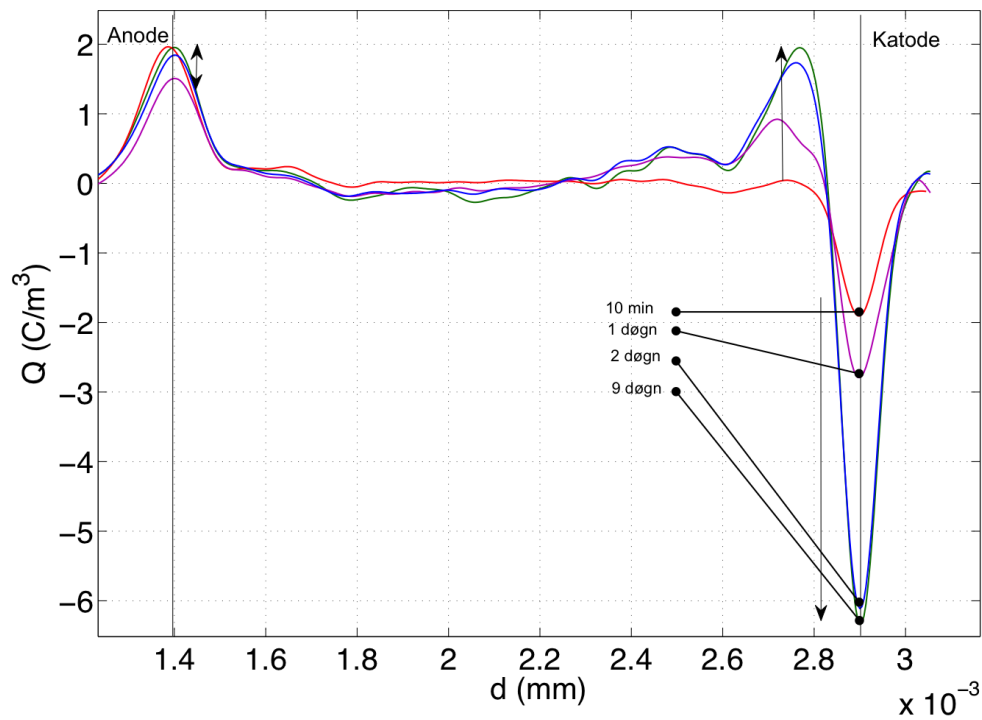
Måleserie #M1 var preget av høy målestøy og ble forkastet som følge.

4.2.1 #M2 (30 kV/mm)

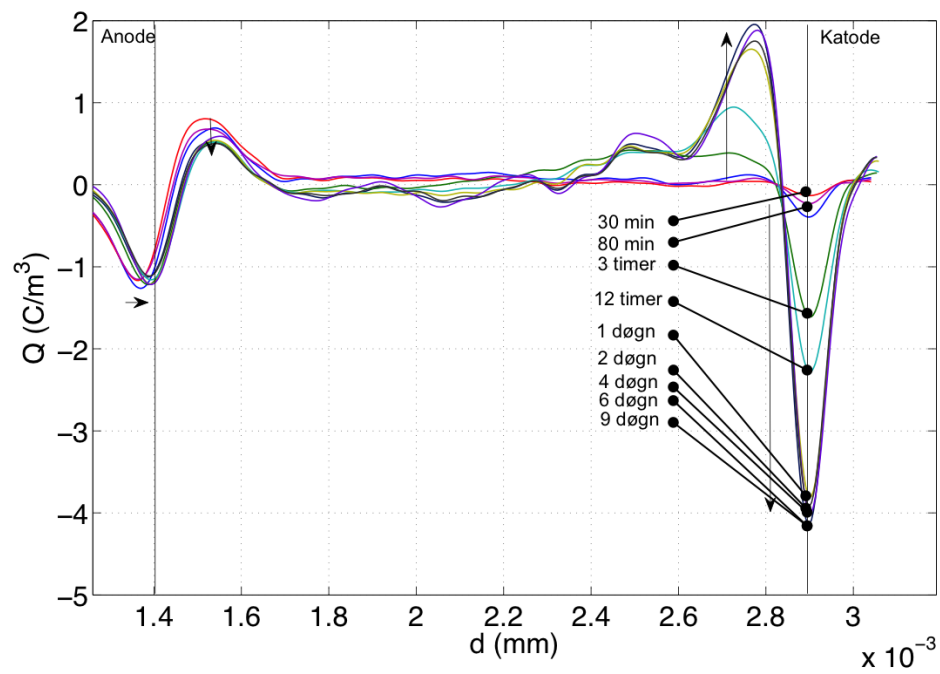
Romladningsfordeling

Figur 4.25 viser utviklingen av romladninger ved påtrykt felt. Ladningene som observeres ved elektrodene følger av DC-spenningen, og tildels induerte ladninger fra romladninger i testobjektet og tildels akkumulerte ladninger i grenseflaten til elektrodene.

Figur 4.26 viser utviklingen ved voltage-off. Utvikling av heteroladninger observeres umiddelbart i nærhet av anoden. En antydning til reduksjon fra 30 min frem mot det 9. døgnet. Ved katoden kan en hurtig utvikling av heteroladninger observeres fra 30 min til ett døgn ($\sim 2 \text{ C/m}^3$). I nærhet av katoden kan en utvikling av homoladninger observeres. Utviklingen foregår hurtig fra 30 min frem mot ett døgn. Fra ett døgn og utover stagnerer utviklingen og en stabilisering ved $\sim -4 \text{ C/m}^3$ kan observeres.



Figur 4.25: Romladningsakkumulasjon ved påtrykt felt 30 kV/mm (voltage-on).

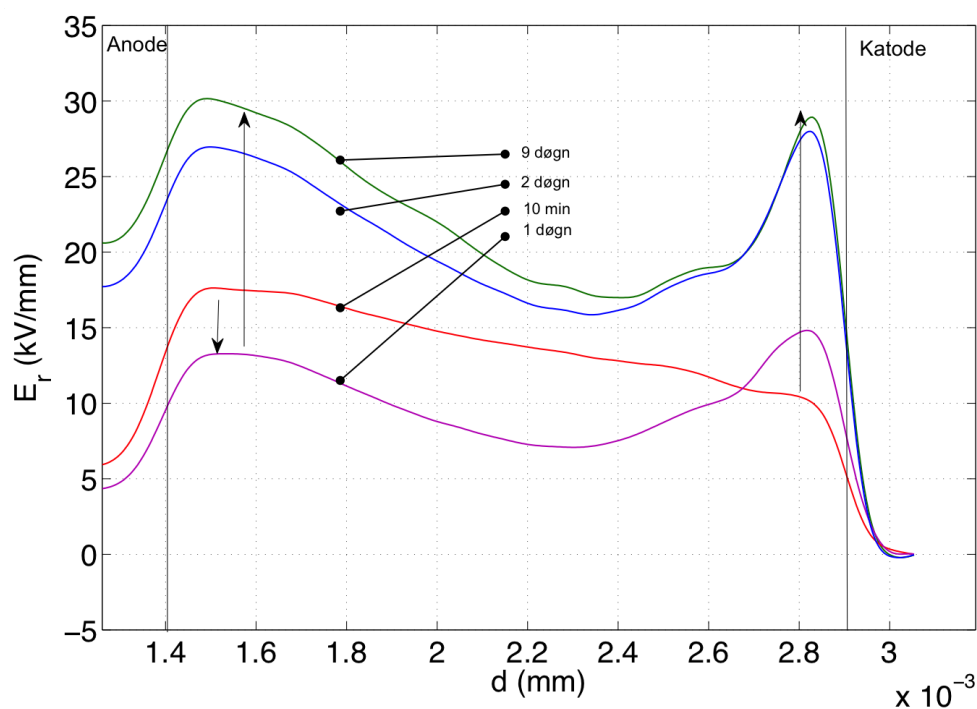


Figur 4.26: Romladningsakkumulasjon ved påtrykt felt 30 V/mm (voltage-off).

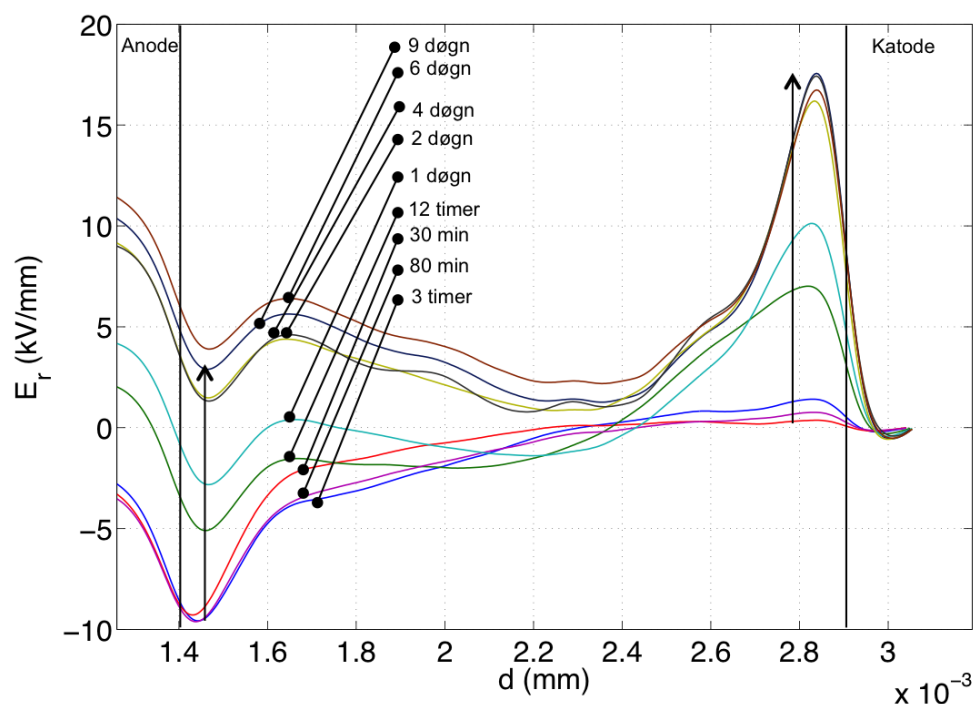
Feltutvikling

Figur 4.27 viser den korresponderende feltutviklingen som følge av akkumulerte romladninger ved påtrykt felt. En tydelig feltøkning som følge av akkumulasjon av heteroladninger kan observeres i nærhet av katoden. Ved anoden reduseres feltet, før det øker frem mot det 9. døgnet. Årsaken til feltøkning er litt uklar da ingen tydelig akkumulasjon av heteroladninger kan observeres i figur 4.26, men heller reduksjon av heteroladninger frem mot det 9. døgnet. Feltet er preget av en del målestøy. Feltet er forskjøvet i forhold til elektrodene. Ideelt sett burde feltene gå mot null ved elektrodene. Unøyaktighetene kan komme av prosesseringen av rådata i Matlab.

Figur 4.28 viser feltet ved voltage-off med maksimal feltforsterkning ved katoden på 56 %. Feltøkningen ved anoden er preget av en større usikkerhet da feltet er forskjøvet i forhold til elektrodene.



Figur 4.27: Feltutvikling ved påtrykt felt 30 kV/mm (voltage-on).



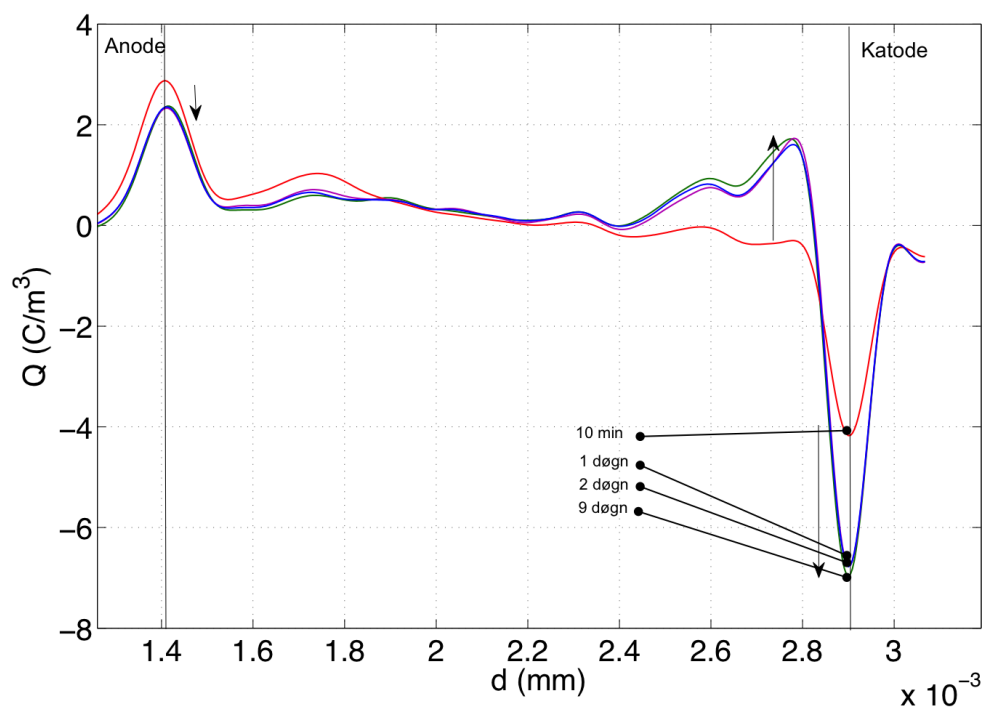
Figur 4.28: Feltutvikling ved påtrykt felt 30 kV/mm (voltage-off).

4.2.2 #M3 (40 kV/mm)

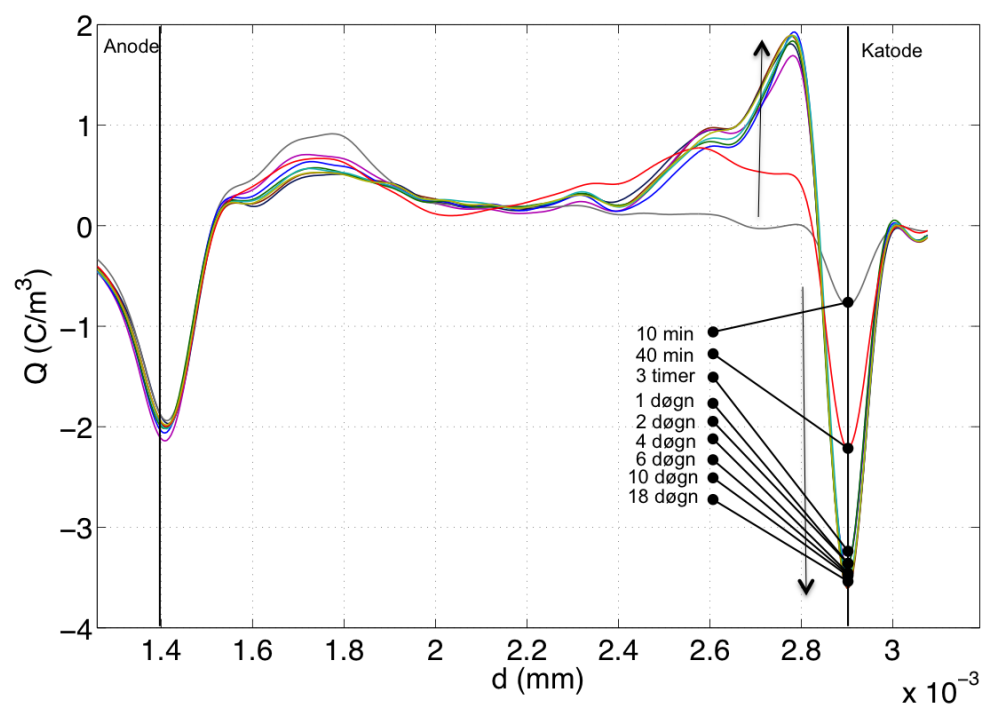
Romladningsfordeling

Figur 4.29 viser romladningsformasjonen ved påtrykt felt. En mindre reduksjon av amplitudetoppen ved anoden, en større økning av amplitudetoppen ved katoden og opphopning av positive ladninger i nærhet av katoden observeres.

Figur 4.30 viser romladningsformasjonen ved voltage-off med markant utvikling av heteroladninger i nærhet av katoden frem mot ett døgn, deretter stabiliseres utviklingen på $\sim 1,9 \text{ C/m}^3$. I grenseflaten til anoden utvikles heteroladninger momentant. Utviklingen er stabil gjennom måleserien (-2 C/m^3). I nærhet av anoden kan en umiddelbar utvikling av homoladninger observeres, utover måleserien reduseres andelen til $\sim 0,5 \text{ C/m}^3$.



Figur 4.29: Romladningsakkumulasjon ved påtrykt felt 40 kV/mm (voltage-on).

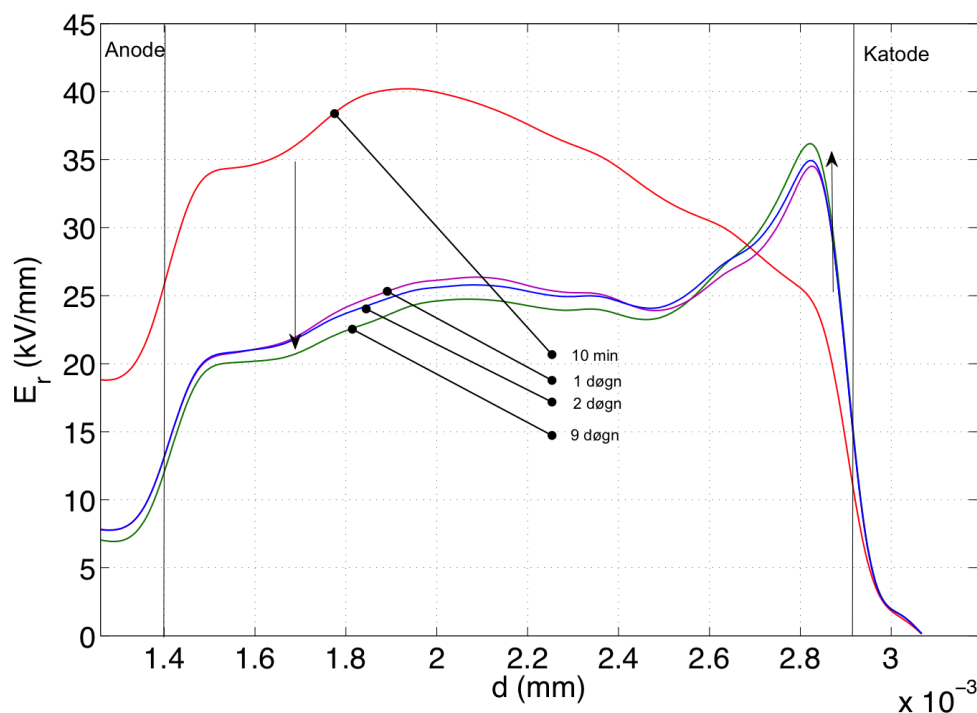


Figur 4.30: Romladningsakkumulasjon ved påtrykt felt 40 kV/mm (voltage-off).

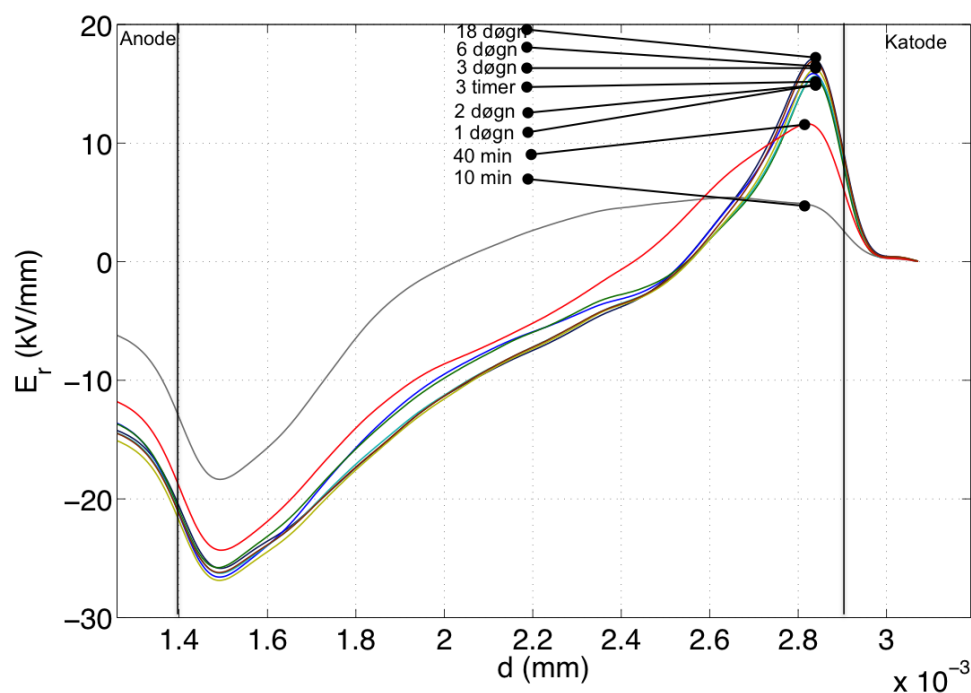
Feltutvikling

Figur 4.31 viser romladningenes innvirkningen på det påtrykte feltet. Utviklingen av heteroladningene ved katoden fører til feltøkning ved katoden. Økningen stabiliseres etter ett døgn. Homoladninger i nærhet av anoden fører til feltreduksjon fra anode mot bulk. Rask utvikling frem mot ett døgn. Feltet er forskjøvet i forhold til elektrodene. Ideelt sett burde feltene gå mot null ved elektrodene.

Figur 4.32 viser romladningsformasjonen ved voltage-off. Maksimal feltforsterkning ved katoden 42,5 % av påtrykt felt. Feltøkningen ved anoden er preget av en større usikkerhet da feltet er forskjøvet i forhold til elektrodene.



Figur 4.31: Feltutvikling ved påtrykt felt 40 kV/mm (voltage-on).



Figur 4.32: Feltutvikling ved påtrykt felt 40 kV/mm (voltage-off).

4.3 Konduktivitet til DC-isolasjonsmateriale

Ledningsevnen til DC-materiale har blitt målt i Rogowski-kopper ved 40°C, 60°C og 80°C. For hver temperatur har en DC-spenning på 5 kV, 7,5 kV og 10 kV blitt påtrykt³.

For hver feltstyrke ble én time støymålinger registrert, deretter én time med måling ved polarisering, etterfulgt av 10 timer ved depolarisering. Medianen av polariseringsstrømmen ved stabilisering har blitt benyttet i den videre beregning av ledningsevnen som følge av lavt støynivå og lav depolariseringsstrøm.

Kapasitansen mellom aluminiumselektrodene ble målt og likning 2.26 ble benyttet for å regne ut konduktiviteten ved de ulike temperaturene og feltverdiene. Konduktiviteten som funksjon elektrisk felt er presentert i figur 4.33. Konduktiviteten som funksjon av temperatur er presentert i figur 4.34.

Konduktiviteten til DC-materialet er funnet ved ekstrapolering av konduktiviteten som funksjon av temperatur. α og β verdiene er basert på gjennomsnitt av verdiene fra trendlinjene i figur 4.33⁴, og σ_0 er funnet ved 20°C og lav elektrisk påkjenning. Konduktiviteten øker ved økende temperatur. Økningen er størst fra 40°C til 60°C.

³Det ble ikke utført målinger ved flere påtrykte spenninger som følge av at høytemperaturteflonkabel ankom sent til testlaboratoriet.

⁴ $\alpha_{40^\circ C} = 0,00686$, $\alpha_{60^\circ C} = 0,0299$ og $\alpha_{80^\circ C} = 0,0289$.

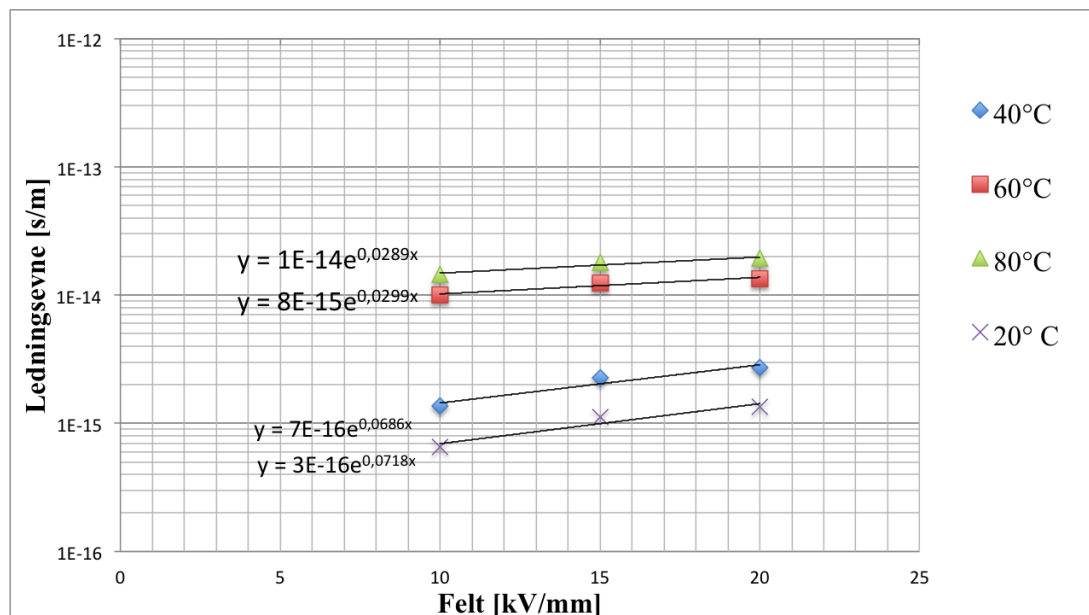
Fra dette er konduktiviteten til DC-materialet er beregnet til:

$$3,0 \cdot 10^{-16} e^{0,0498E+0,0533T} \quad (4.1)$$

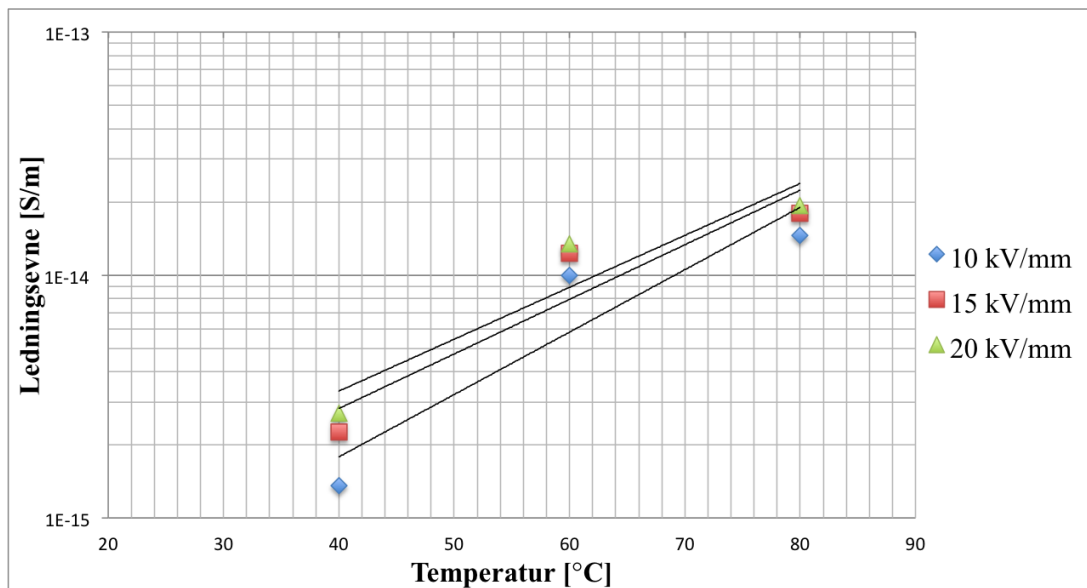
Konduktiviteten til AC-materialet er tidligere målt til [24]:

$$1,0 \cdot 10^{-18} e^{0,1454E+0,1347T} \quad (4.2)$$

I tidligere målinger har det vært benyttet halvledende-elektroder, og i denne rapporten har aluminiumselektroder blitt benyttet. Som følge av at halvledende-materiale og aluminium har ulik arbeidsfunksjon, kan dette representere et usikkerhetsmoment.



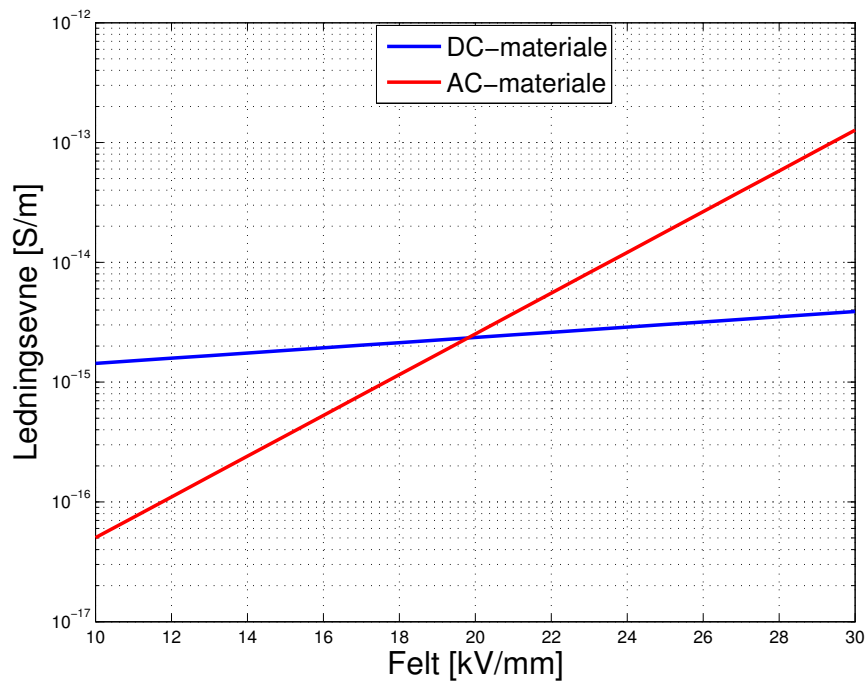
Figur 4.33: Konduktivitetsmåling XLPE - DC.



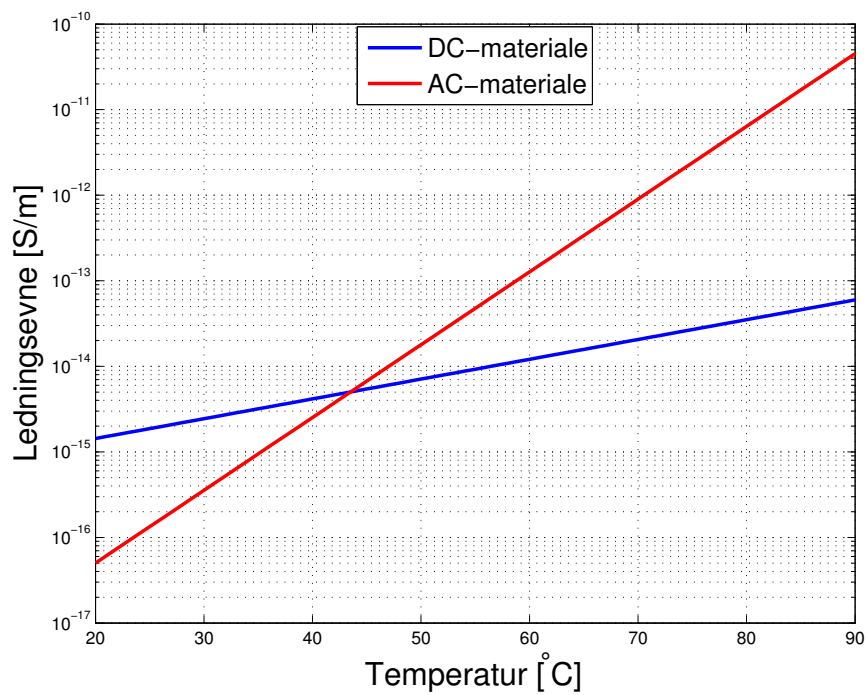
Figur 4.34: Konduktivitetmåling XLPE - DC

Figur 4.35a viser feltavhengigheten til AC- og DC-materialet ved referansetemperaturer 20°C. Utfra målinger av ledningsevnen har DC-materialet en tilsynelatende mindre feltavhengighet enn AC-materialet.

Figur 4.35b viser temperaturavhengigheten ved et påtrykt felt på 10 kV/mm. DC-materialet har en tilsynelatende lavere temperaturavhengighet enn AC-materialet.



(a) Feltavhengighet ved 20°C



(b) Temperaturavhengighet ved 10 kV/mm

Figur 4.35: Sammenligning mellom felt- og temperaturavhengighet til DC- og AC-materialet.

Kapittel 5

Diskusjon

5.1 Flate testobjekt av lagdelt isolasjon

Målet med oppgaven er å kartlegge romladningsformasjonen og den korresponderende elektriske feltutviklingen i lagdelt isolasjon. Dette har blitt utført ved å fremstille flate testobjekter bestående av et lag med tidligere kryssbundet AC-materiale, kryssbundet sammen med DC-materiale. Målinger har blitt utført med Pulsed electro-acoustic method (PEA) for flate testobjekt. Elektrisk gjennomsnittsfelt på 20, 30 og 40 kV/mm har blitt påtrykt med en varighet mellom én til to uker. Ved 20 og 30 kV/mm har det blitt gjennomført to måleserier for å undersøke reproduserbarheten og for å oppnå et forbedret signal.

I diskusjonen vil generelle utviklingstrekk som foregår i begynnelsen av måleserien bli drøftet. Deretter vil mer spesifikke utviklingstrekk bli behandlet.

Tabell 5.1: Flate testobjekt av lagdelt isolasjon.

Testobjekt	#1	#2	#3	#4	#5
Påtrykt DC-spenning [kV]	10	10	15	15	20
Gjennomsnittlig feltfordeling [kV/mm]	20	20	30	30	40
Varighet [døgn]	16	11	18	5	15

Elektrode-polymer

I samtlige testobjekt observeres en utvikling av homoladninger i grenseflaten til elektrodene kort tid etter påtrykt felt (se figurer 4.3, 4.7, 4.11, 4.15 og 4.19). I grenseflaten ved katoden reverseres utviklingen og en gradvis utvikling av heteroladninger observeres. Utviklingen er felles for alle de flate testobjektene, og er også observert i tidligere undersøkelser av flate testobjekt bestående DC-materiale[25, 29]. Den observerte utviklingen foregår i perioden fra 10 min til

40 min avhengig av påtrykt felt. Høyere påtrykt felt gir en hurtigere respons og raskere overgang fra homoladninger til utvikling av heteroladninger.

En forklaringsmodell på den umiddelbare utviklingen av homoladninger ved elektrodene kan være at ladningsinjeksjon fra elektrodene foregår hurtigere enn ladningstransporten i isolasjonen. Ved katoden injiseres elektroner, og ved anoden ekstraheres elektroner og etterlater hull. Ved forholdsvis lave påtrykte felt ($< 100 \text{ kV/mm}$) er *Schottky-injeksjon* en mulig mekanisme[1, 3]. En annen forklaringsmodell for ladningsinjeksjon er *Fowler-Nordheim*. I teorien er denne mekanismen gjeldene for høye felt over 100 kV/mm og er derfor utenfor gyldighetsområdet til resultatene i denne oppgaven[3].

Ved *Schottky-injeksjon* vil den potensielle energibarrieren reduseres ved høyere påtrykt felt som igjen vil føre til økt injeksjon av ladninger (se likning 2.14 og 2.15 i teorigapittelet). Det vil kunne gi raskere respons og økt akkumulasjon av ladninger i samsvar med observert utvikling.

Tidligere undersøkelser har visst at injeksjon og opphopning av ladninger dannes ved henholdsvis 10 kV/mm og $12,5 \text{ kV/mm}$ (gjennomsnittlig påtrykt felt) for AC- og DC-materiale¹ [24]. Ved påtrykt felt på 20 kV/mm og høyere, er feltet påtrykt godt innenfor marginen hvor injeksjon og akkumulasjon av ladninger vil oppstå.

Reversering og utvikling av heteroladninger i grenseflaten til katoden

Fra 10 til 40 minutter går utviklingen fra homoladninger til utvikling av heteroladninger i grenseflaten til katoden. Utviklingen foregår hurtigere ved økt påtrykt felt.

En forklaring kan være at ladningstransporten i materialet foregår hurtigere enn injeksjonen av ladninger: $J_{injisert}(E; T) < J_{transport}(E; T)$. En slik utvikling er observert i flate testobjekt bestående av ett lag med isolasjon[25]. En mulig forklaring er positive ladninger i form av hull og positive ioner vil drifte mot katoden. Hull vil bli ekstrahert/rekombineres ved injisering av elektroner. I tillegg vil en mindre konsentrasjon av ioner være tilstede i materialet som følge av kjemiske reststoffer, urenheter og oksidasjon fra fremstilling og lagring av objektene. Ioner er massetransport og vil ikke bli ekstrahert av katoden. Ionene vil derfor akkumuleres i grenseflaten til katoden og bidra til et heterogent ladningsområde. En del av ladningene i grenseflaten vil kunne *nøytraliseres* som følge av injeksjon av elektroner². En årsak til en senere utvikling av heteroladninger kan være at elektronisk transport foregår hurtigere enn ionisk transport, og vil derfor kunne dominere i begynnelsen av måleserien[16].

¹I den tidligere undersøkelsen besto AC-materialet av LS4201S og en eldre variant av DC-materialet LE4253DC15.

²PEA-målescellen måler nettoladningsakkumulasjon som betyr at summen av ladningene detekteres.

Dielektrisk grenseflate mellom lagdelt isolasjon

I grenseflaten kan en markant akkumulasjon av negative ladninger observeres i alle testobjektene. Utviklingen foregår hurtig de første dagene, deretter avtar utviklingen. I testobjekt #1, #2 og #5 kan en mindre antydning til akkumulasjon av positive ladninger observeres ved dielektrisk grenseflate på anodesiden. Akkumulasjonen av positive ladninger foregår ved langt mindre hastighet og stabiliseres i løpet av måleserien.

Svært mange mekanismer kan bidra til utvikling av romladninger i grenseflaten. Generelt vil romladninger akkumuleres på en grenseflate ved en ulikhet i isolasjonens konduktivitet og permittivitet: $\nabla \frac{\epsilon}{\sigma} \neq 0$. I tillegg vil ladningsansamlingen påvirkes av mikroskopiske egenskaper. Grenseflaten kan blant annet ha en høyere konsentrasjon av amorfe regioner og krystalldefekter som følge av ufullstendig kryssbinding mellom isolasjonslagene[26]. I tillegg kommer egenskaper som overflateruhet, oksidering, overflatens ledningsevne og valg av elektrodemateriale[27]. Påvirkningen fra disse egenskapene er krevende å forutse og kan variere fra testobjekt til testobjekt.

De sannsynlige mekanismene til utvikling av ladninger i grenseflaten vil bli diskutert nedenfor. Først vil ledningsevnenes betydning bli vurdert, deretter vil andre mekanismer bli drøftet basert på referansemålinger. I referansemålingene har et testobjekt bestått av lagdelt isolasjon av AC- og DC-materiale, og et testobjekt har bestått av to lag med DC-materiale. Testobjektene har kun gjennomgått en kryssbinding, mot dobbel kryssbinding av AC-materialet i testobjekt #1-5. Referansemålingene er vist i avsnitt 4.1.2 og i figurene 4.22, 4.23, 4.24.

Ulik ledningsevne

Ledningsevnen til DC-materialet er høyere enn AC-materialet ved lavt påtrykt felt ved 20°C.

DC-materiale:

$$3,0 \cdot 10^{-16} e^{0,0498E+0,0533T} \left[\frac{S}{m} \right] \quad (5.1)$$

AC-materialet er målt til[24]³:

³I denne oppgaven har måling av ledningsevne på DC-materialet blitt utført på koppobjekter med pådampmet aluminium. Ledningsevnen til AC-materialet har blitt utført på test objekter med halvledende elektroder i en tidligere oppgave[24]. Det kan ha innvirkning på resultatene som følge av at måling av ledningsevne er en statistisk prosess. Det er mulig å måle ledningsevne på identiske materialer og få ulike resultater. I tillegg kommer elektrodematerialets innvirkning på ledningsevnen. Halvledene elektrode har en ulik arbeidsfunksjon enn aluminium[5].

$$1,0 \cdot 10^{-18} e^{0,1454E+0,1347T} \left[\frac{S}{m} \right] \quad (5.2)$$

En høyere ledningsevne i DC-materialet kan føre til raskere transport av negative ladninger fra katoden mot anoden i lag-dc. En lavere konduktivitet i AC-materialet kan føre til at ladningene opphopes i grenseflaten.

Tilsvarende vil hulltransporten og transporten av positive ladninger fra anoden foregå langsommere i AC-materialet, og raskere i DC-materialet. Dette kan dermed motvirke ladningsakkumulasjon av positive ladninger i grenseflaten til DC-materialet.

Ut fra målingene på ledningsevne kan akkumulasjonen av ladninger beregnes analytisk med Maxwell-Wagners likning (se teorikapittel avsnitt 2.4.6).

Figur 4.35a viser ledningsevnen til AC- og DC-materialet ved 20°C. Ledningsevnen er presentert som funksjon av påtrykt felt. Forskjellen i ledningsevne er marginal ved 20 kV/mm. Ved felt over 20 kV/mm er ledningsevnen til AC-materialet høyere enn DC-materialet. DC-materialet er mindre felt- og temperaturavhengig enn AC-materialet.

Som følge av en høyere ledningsevne i AC-materialet ved høyere påtrykt felt, kunne det vært sannsynlig i følge Maxwell-Wagner (se avsnitt 2.4.6 i teorikapittel), at utviklingen av negative ladninger i grenseflaten ville reduseres ved høyere påtrykt felt.

Videre ville det sannsynliggjøre en utvikling av positive ladninger i grenseflaten til DC-materialet som følge av positive ladninger som transporteres fra anoden mot katoden. En mindre antydning til akkumulasjon av positive ladninger i grenseflaten til DC-materialet er observert ved påtrykt felt 40 kV/mm (se figurer 4.7 og 4.19). Dette kan være en konsekvens av hurtigere transport i AC-materialet som følge av høyere konduktivitet. Utviklingen av negative ladninger, derimot, øker ved økt påtrykt felt.

Referansemålinger - grenseflateeffekter

I referansemålingene (se avsnitt 4.1.2) der AC- og DC-materiale kryssbindes sammen, uten å ha gjennomgått en kryssbindingprosess tidligere, er akkumulasjonen av ladninger i grenseflaten langt mindre og i nærheten av sensitiviteten til PEA-målecellen (se figur 4.23). I figur 4.24 der begge lagene med isolasjon består av DC-materiale, kan også en antydning til grenseflate observeres i nærheten av sensitiviteten til målecellen. Et elektrisk felt på 20 kV/mm har blitt påtrykt testobjektene over en periode på 24 timer. Ved 20 kV/mm skal konduktiviteten til AC- og DC-materialet være tilnærmet like ved 20°C (se figur 4.35a). Resultatene

sannsynliggjør at ledningsevnen til materialene ikke er tilstrekkelig for å avgjøre årsakene til akkumulasjonen av ladninger i grenseflaten.

Ut fra observerte måleresultater kan den dielektriske grenseflaten ha tilsynelatende blokkerende effekt på negative ladninger, men en mindre blokkerende effekt på positive ladninger. Tilsvarende observasjoner er rapportert i undersøkelser på grenseflater av polyetylen[28]. Årsaken til den blokkerende effekten kan være en høyere konsentrasjon av elektronfeller i grenseflaten. Forekomsten av feller er sterkt relatert til tilsetningsstoffene i polymeren som har en tendens til å konsentrere seg i de amorfe regionene[3]. Grenseflaten kan ha større regioner med amorfe regioner og krystaldefekter som følge av ufullstendig kryssbinding mellom isolasjonslagene. AC-materialet er tidligere kryssbundet, noe som kan sannsynliggjøre en ufullstendig kryssbinding mellom AC- og DC-laget og at grenseflaten mellom isolasjonslagene ikke har oppnådd lik morfologisk tilstand som resten av isolasjonen[27]. Det er også påpekt at polymeriske grenseflater har en negativ elektronaffinitet, som også kan fungere som en barriere for videre drift av elektroner. Det vil dermed kreve mer energi for at elektroner skal bli absorbert[11].

Reproduserbarhet

Flere måleserier har blitt utført ved 20 og 30 kV/mm for å kontrollere reproduserbarheten. Testobjektene #1 og #2 har blitt fremstilt ved lik fremgangsmåte og begge blitt påtrykt felt på 20 kV/mm. Ideelt sett ville testobjektene ha en lik ladningsfordeling, allikevel observeres store individuelle forskjeller (se figurer 4.3 og 4.7).

Tilsvarende ulikheter kan observeres mellom testobjekt #3 og #4 ved påtrykt felt 30 kV/mm. Et mer spredt negativt ladningsområde kan observeres i testobjekt #3 i lag-dc mot et mer konsentrert negativt ladningsområde ved dielektrisk grenseflate i testobjekt #4.

De markante forskjellene kan gi en indikasjon på at morfologien spiller en betydelig rolle i utviklingen av romladninger. Tiltross for lik produksjonsprosess kan det oppstå store forskjeller i morfologien til testobjektene, og dermed utviklingen av romladninger⁴.

Feltutvikling

Akkumulasjonen av homoladninger ved katode og dielektrisk grenseflate fører til redusert feltbelastning ved katoden. Netto akkumulasjon av heteroladninger ved

⁴I videre arbeid vil noen anbefalinger til en annen metodikk ved støping og kryssbindinger bli presentert. En slik metodikk kan redusere antall grenseflater og forhåpentligvis gi en forbedret reproduserbarhet.

anoden fører til økt feltforsterkning ved anoden. I tabell 5.2 kan en observere at maksimal feltforsterkning oppstår i testobjekt #3 på 50 % av påtrykt gjennomsnittsfelt. Årsaken kan skyldes mer støy i målekretsen i forhold til de øvrige testobjektene (se kalibreringssignal A.6).

Tabell 5.2: Maksimal feltreduksjon og feltøkning i flate lagdelte testobjekt

Testobjekt	#1	#2	#3	#4	#5
Maksimal feltreduksjon (ved katode)	30 %	17 %	30 %	17 %	30 %
Maksimal feltøkning (ved anode)	16 %	20 %	50 %	17 %	30 %
Gjennomsnittlig feltfordeling [kV/mm]	20	20	30	30	40

5.2 Miniaturkabel

Romladningsformasjonen og den korresponderende elektriske feltutviklingen har blitt kartlagt for miniaturkabler med kryssbundet HVDC-isolasjon. Romladningsformasjonen og feltutviklingen er diskutert og sammenlignet med tidligere målinger av miniaturkabler med kryssbundet HVAC-isolasjon.

Tabell 5.3: Miniaturkabler

Testobjekt	#M1	#M2	#M3
Påtrykt DC-spenning [kV]	30	45	60
Gjennomsnittlig feltfordeling [kV/mm]	20	30	40
Varighet [døgn]	18	9	18

Resultatene er preget av mer målestøy enn de flate testobjektene som følge kabelgeometrien, tykkelsen på isolasjonen og halvlederen. Det oppfangede signalet er mer attenuert og dispergert, og vil ved prosessering i Matlab, bli preget av en større usikkerhet⁵. Resultatene gir allikevel et tydelig inntrykk av romladningsfordelingen og den korresponderende feltutviklingen over isolasjonen.

Elektrode-polymer ved katode

I grenseflaten til katoden (ytte halvleder) utvikles homoladninger i begynnelsen av måleserien. I umiddelbar nærhet til katoden utvikles heteroladninger. Utviklingen er analog i måleserie #M2 og #M3 ved henholdsvis 30 og 40 kV/mm påtrykt felt (se figurer 4.26 og 4.30).

I testobjekt #M2 utvikles homoladninger hurtig i grenseflaten til katoden frem mot to døgn, deretter avtar utviklingen og går mot en stabil verdi. Utviklingen av

⁵Målingene oppnådd på miniaturkabler inneholder mindre støy enn tidligere målinger[25]. Se kalibreringssignal i vedlegg.

heteroladninger i umiddelbar nærhet av katoden følger utviklingen ved anoden, og stabiliseres etter to døgn.

I testobjekt #M3 stabiliseres utviklingen av homoladninger ved katoden etter tre timer. I nærhet av katoden kan en tilsvarende stabilisering av heteroladninger observeres etter tre timer.

Utviklingen av homoladninger i grenseflaten til katoden og utviklingen av heteroladninger i nærhet av katoden, er svært korresponderende. Det indikerer at utviklingen av homoladninger ved elektrodene skyldes speilladninger induert av ladningene i nærhet av katoden og i bulk. Det bekreftes i det korresponderende elektriske feltet (se figurer 4.28 og 4.32) der akkumulasjonen av heteroladninger i nærhet av katoden fører til økt feltforsterkning.

Utviklingen av heteroladninger i nærhet av katoden kan skyldes ionisering av kjemiske stoffer og urenheter i bulk som akkumuleres, da det ikke kan bli ekstrahert av katoden. Tidligere undersøkelser har konkludert med at injeksjon og fanging av hull er dominerende mekanismer ved bruk av halvleder som elektrode[5]. Det er samsvarende med måleresultatene fra #M2 og #M3, der begge måleseriene har en nettoakkumulasjon av positive ladninger i bulk.

Miniatyrkabelen er klargjort fra samme kabellengde, og vil følgelig inneholde de samme urenheterne og kjemiske stoffene. Det kan være en årsak til at utviklingen er nokså lik mellom testobjektene. Området i nærheten av katoden kan bestå av en større konsentrasjon med amorfe regioner og dermed større tetthet av feller sammenlignet med bulk.

Elektrode-polymer ved anode

Ved anoden i måleserie #M2 og #M3 utvikles heteroladninger umiddelbart etter påtrykt felt. Andelen heteroladninger er stabil gjennom hele måleserien.

I nærhet av anoden mot bulk utvikles homoladninger umiddelbart etter påtrykt felt (se figurer 4.26 og 4.30). Andelen reduseres noe frem mot 10 døgn. Reduksjonen kan skyldes hullinjeksjon som rekombineres med elektroner injisert fra katoden. Utviklingen og transporten av ladninger stabiliseres etter 1 døgn.

Generelt stabiliseres utviklingen langt raskere i miniatyrkabelen enn i flateprøvene. Stabilisering observeres etter 1 - 2 døgn sammenlignet med 9 - 18 døgn i flate lagdelte testobjekt. Som følge av en tykkere kabelisolasjon var det ventet at en stabilisering av akkumulerte ladninger ville tatt lengre tid i miniatyrkablene sammenlignet med flate testobjekt[8]. Årsaken kan være ulikt elektrodemateriale. I et energibånd-perspektiv har halvledene materiale en liknende struktur som kryssbundet polyetylen. En mulig konsekvens av dette er en vesentlig mindre potensialbarriere mellom isolasjonen og halvleder sammenlignet med metallektrode av gull. En konsekvens kan være høyere ladningsinjeksjon sammenliknet med metallektrode av gull benyttet for flate testobjekt[26].

Feltutvikling

I testobjekt #M2 fører utviklingen av heteroladninger ved katoden til økt feltforsterkning og redusert felt ved anoden mot bulk. Maksimal feltforsterkning ved katoden på 56 % av påtrykt felt 30 kV/mm etter ett døgn (se figur 4.28). I testobjekt #M3 fører utviklingen av heteroladninger ved katoden til maksimal feltforsterkning ved katoden på 53 % av påtrykt felt på 40 kV/mm etter 9 døgn (se figur 4.32). Utviklingen ved anoden er mer usikker da elektrodene er forskjøvet og skulle normalt gått mot 0 ved elektrodene.

Sammenligning med miniatyrkabler bestående av AC-isolasjon

I tidligere rapporter har romladningsformasjonen og den korresponderende feltendringen i miniatyrkabler bestående av AC-materialet blitt kartlagt [25, 29].

Tabell 5.4: Miniatyrkabler

Testobjekt	DC-materiale	DC-materiale	AC-materiale [25]	AC-materiale [25]	AC-materiale [29]	AC-materiale [29]
Påtrykt gjennomsnittsfelt [kV/mm]	30	40	30	40	30	40
Feltøkning[%]	56	53	27	27,5	47,5	32,5

Feltendringen i miniatyrkabler bestående av DC-materiale viser en betydelig høyere verdi enn tidligere målinger utført på AC-materiale. Kalibreringssignalerne inneholder mer støy enn kalibreringssignalene for flate testobjekt og kan være en årsak til den høye feltendringen observert i DC-materialet (se figurer A.10 og A.11). Feltøkningen på 47,5 % av påtrykt snittfelt på 30 kV/mm i AC-materialet kan videre indikere høy usikkerhet, og at flere målinger ved hvert påtrykt felt kunne gitt et mer nøyaktig bilde av feltendringen.

Feilkilder

PEA-målingene er utført i et testmiljø hvor vibrasjoner, variasjon av temperatur og forstyrrelser fra andre måleinstrumenter kan påvirke resultatene. Målestøyen er spesielt høy for miniatyrkabelen noe som igjen kan gi utslag på målingene og beregningen av feltet.

Kapittel 6

Konklusjon

Lagdelt isolasjon

Den dielektrisk grenseflate har en vesentlig betydning for akkumulasjon av negative ladninger. Økende akkumulasjon i grenseflaten ved høyere påtrykt felt. Utviklingen av romladninger fører til en markant feltendring over isolasjonen.

Maksimal feltreduksjon oppstår i nærhet av katoden som følge av en høy nettoakkumulasjon av heteroladninger i nærhet av katoden og i dielektrisk grenseflate.

Maksimal feltøkning oppstår i nærhet av anoden som følge av nettoakkumulasjon av heteroladninger. Feltreduksjonen ved katoden og feltøkningen ved anoden øker med tiden og oppstår i slutten av måleseriene. Måleseriene har for kort varighet til å avgjøre om utviklingen stabiliseres.

Ledningsevnen til DC-materialet (LE4253DC15) er målt til:

$$3,0 \cdot 10^{-16} e^{0,0498E+0,0533T} \left[\frac{S}{m} \right] \quad (6.1)$$

Ledningsevnen til AC-materialet (LS4201S) er tidligere målt til[24]:

$$1,0 \cdot 10^{-18} e^{0,1454E+0,1347T} \left[\frac{S}{m} \right] \quad (6.2)$$

Ledningsevnen til DC-materialet har en mindre felt- og temperaturavhengighet sammenlignet med AC-materialet. Ledningsevnen til AC-materialet er høyere enn DC-materialet for temperaturer over 20°C og for elektriske felt over 20 kV/mm. Målemetoden og elektrodematerialet benyttet har vært ulike og presenterer et høyt usikkerhetsmoment¹.

PEA-målinger med lagdelt isolasjon bestående av AC- og DC-materiale der ingen av lagene tidligere har vært kryssbundet, viser en langt mindre akkumulasjon av

¹Rogowskikopper med aluminiumselektrode har blitt benyttet på DC-materialet, og halvledende materiale har vært benyttet i på AC-materialet.

negative ladninger sammenlignet med lagdelt isolasjon der AC-materiale er dobbelt kryssbundet. Det kan være sannsynlig at andre egenskaper som oksidering, urenheter, ufullstending kryssbinding og høyere konsentrasjon av amorfe regioner i grenseflaten, har en vesentlig betydning for akkumuleringen av negative ladninger, enn kun basert på konduktivitet. I *Videre arbeid* er det beskrevet hvordan noen av usikkerhetsmomentene kan reduseres.

Miniatyrkabel

Resultatene fra romlademålinger på miniatyrkabel viste at grenseflatene til elektrodene har en vesentlig betydning for akkumulasjon av ladninger. Stabilisering og likevekt oppnås etter ett døgn. Utviklingen av ladninger er tilsynelatende uavhengig av påtrykt felt. Akkumuleringen av ladninger er dominert av positive ladninger. Årsaken kan skyldes en mer injiserende halvledende elektrode i forhold til gullelektrode som er benyttet på flate testobjekt. Ved bruk av halvledene elektrode skal injeksjon av hull og fanging av hull være dominerende mekanismer[5, 30]. Dette er i samsvar med resultatene oppnådd i denne rapporten.

I testobjekt #M2 og #M3 oppnås en maksimal feltforsterkning ved katoden på henholdsvis 56% og 53% av påtrykt gjennomsnittsfelt. Dette er endel høyere enn tidligere romlademålinger på miniatyrkabler bestående av AC-materiale[25, 29]. Ved en polaritetsendring vil denne feltforsterkning komme i tillegg til bakgrunnsfeltet og dermed redusere den effektive isolasjonstykkelsen, og verste fall føre til havari.

Kapittel 7

Forslag til videre arbeid

Flate lagdelte testobjekt

Utføre måleserier på flate lagdelte testobjekt bestående av et lag tidligere kryssbundet DC-materiale, kryssbundet sammen et lag DC-materiale og elektrodemateriale av gull. Utføre måleserier på tilsvarende materiale med elektrodemateriale bestående av halvleder. Utføre PEA-målinger ved høyere temperaturer på DC-materiale og sammenligne det med AC-materialet. Fra kabelprodusentenes perspektiv er det ønskelig med et materiale som er minst mulig temperaturavhengig, en slik test vil kunne undersøke om DC-materialet faktisk er mindre temperaturavhengig enn AC-materialet.

Utføre målinger av ledningsevnen til DC-materialet ved flere enn tre feltstyrker for hver temperatur. Det vil gi en mer sikker predikasjon på ledningsevnen. Videre kan det utføres målinger på ledningsevnen til dobbelt kryssbundet DC-materiale for å undersøke om ledningsevnen endres ved en dobbel kryssbinding. Endres ledningsevnen kan Maxwell-Wagnes likning benyttes for å kalkulere akkumulert ladningsansamling i grenseflaten mellom dobbelt og enkelt kryssbundet DC-materiale.

Ved fremstilling av flate testobjekt kan den ekstruderte filmen klippes opp etter formen til støpeformene. Dette kan minimere hulromdannelser og mulige grenseflater som kan oppstå når ekstrudert film klippes opp i tynne strimler (se avsnitt 3.1.2 i metoden).

Miniatyrkabler

For miniatyrkabler kan flere måleserier utføres for hvert påtrykt felt til stabilisering er oppnådd for å undersøke reproduserbarheten.

Bibliografi

- [1] Giovanni Mazzanti, Massimo Marzinotto, “Extruded Cables for High-Voltage Direct-Current Transmission,” *Advances in Research and Development*, IEEE Press, Wiley, 2013.
- [2] F. Fälth, S. Kumar, H. Ghorbani “Robustness Analysis of Classical High Voltage Joint Design Under High Voltage DC Stress”, *Nordic Insulation Symposium - Nord-IS 13 - Trondheim, Norway, June 9 - 12, 2013*
- [3] L.A. Dissado, J.C. Fothergill, “ *Electrical Degradation and Breakdown in Polymers*”, The Institution of Engineering and Technology, London, United Kingdom, 1992.
- [4] E. Ildstad, “High Voltage Insulation Materials”, Dept. Elect. Eng., NTNU, Trondheim, Norway, Aug. 2012.
- [5] B. Sanden, “XLPE cable insulation subjected to HVDC stress, Ph.D. dissertation, Dept. Elect. Eng., NTNU, Trondheim, Norway, Nov. 1996.
- [6] F.H. Kreuger, “*Industrial High DC voltage*”, Delft University, Delft, Netherlands 1995.
- [7] Lecture 14 Semicrystalline Materials, <http://gertrude-old.case.edu/276/materials/145/14.htm>, jan. 2002.
- [8] Y.L. Chong et. al., “Heat treatment of cross-linked polyethylene and its effect on morphology and space charge evolution,” *IEEE Transactions on Dielectrics and Electr. Insul.*, Vol 12 No. 6; pp. 1209 – 1221, Dec. 2005.
- [9] Andrzej Urbanczyk, “State of the art XLPE compounds for power cables and recent developments”, *Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE), 2011 7th International Symposium on Advanced topics in electrical engineering*, Bucharest, May 12-14, 2011.
- [10] R. Bodega, “*Space Charge Accumulation in Polymeric High Voltage DC Cable Systems*,” Ph.D. dissertation, Delft University, Delft, Netherlands, 2006.

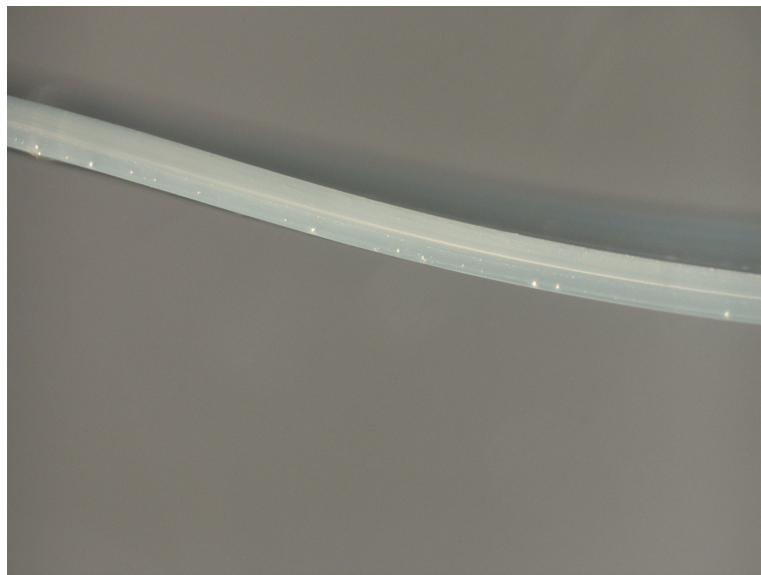
- [11] G. Teyssedre og C. Laurent, "Charge Transport Modeling in Insulation Polymers: From Molecular to Macroscopic Scale", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* Vol. 12, No. 5; October 2005.
- [12] Belma Alijagic-Jonuz "Dielectric Properties and Space Charge Dynamics of Polymeric High Voltage DC Insulating Materials", Ph.D. dissertation dec 2007, Delft University, Delft, Netherlands,
- [13] Kwan Chi Kao, "*Dielectric Phenomena in Solids: with emphasis on physical concepts of electronic processes*," Computer Engineering University of Manitoba, London, UK, 2004.
- [14] <http://snl.no/elektronaffinitet> [Besøkt: 25.4.14]
- [15] H. ZHENG et al., "Influence of cable clamping force on PEA measurements on HVDC mini-cables," in *2013 IEEE International Conference Solid Dielectrics*, Bologna, Italy, June 30 - July 4, 2013.
- [16] F. Rogti, M. Ferhat, "Maxwell-Wagner polarization and interfacial charge at the multilayers of thermoplastic polymers", in *Journal of Electrostatics* 72, 2013 - 91 - 97.
- [17] Chen, G, Chong, Y L and Fu, M(2006) "Calibration of the Pulsed Electroacoustic Technique in the Presence of Trapped Charge", *Measurement Science and Technology*, 17(7), 1974-1980.
- [18] T. Maeno, T. Futami, H. Kushibe, T. Takada, "Measurement of Spatial Charge Distribution in Thick Dielectrics Using the pulsed Electroacoustic Method," *IEEE Transactions on Electrical insulation*, 23(3):pp 433 -439, jun 1988.
- [19] *IEC93 - Volume and surface resistivity of solid electrical insulation materials*", IEC93, 1980.
- [20] GSM industries 2009. Plastic Extruder Machinery, <http://www.gsmindustries.co.in/pages/products/plastic-extruder-machine-ry.html>
- [21] Nilsson, U. H., Borealis, "The Use of Model Cable for Evaluation of the Electrical Performance of Polymeric Power Cable Materials," *Nordic Insulation Symposium*, June 13-15, 2005.
- [22] TechImp Systems, "PEA FLAT SYSTEM", *operator's manual*, TechImp Systems, Viale Toscana 11 c, 40069 Zola Predosa, Italy.
- [23] TechImp Systems, "PEA CABLE SYSTEM", *Operator's manual*, TechImp Systems, Viale Toscana 11 c, 40069 Zola Predosa, Italy.
- [24] Ruth H. Kyte, "Romladningsfordeling i PEX-isolerte HVDC-kabler", Masteroppgave, NTNU, juni 2011.

- [25] Jens Eirik Hagen, “Romladningsdistribusjon i XLPE HVDC kabelisolasjon”, Prosjektoppgave, NTNU, desember 2013.
- [26] G. Chen, “Interfaces and Space Charge in Polymeric Insulating Materials”, *Mater. Res. Soc. Symp. Proc. Vol. 889 2006 Materials Research Society*, School of Electronics and Computer Science, University of Southampton, UK.
- [27] M. Jeroense, M. Lindgren, A. Gustafsson, T. Schütte, “Interface Charge in polymer Laminates”, *1998 IEEE Int. Conf. on Cond. and Breakdown in Solid Dielectrics, June 22-25, 1998, Västerås, Sweden* ABB Corporate Research, Sweden.
- [28] G. Chen, Y. Tanaka, T. Takada, L. Zhong “Effect of Polyethylene Interface on Space Charge Formation”, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 11, No. 1; February 2004*, School of Electronics and Computer Science, University of Southampton, UK.
- [29] Line Helland, “Romladningsdistribusjon i XLPE HVDC kabelisolasjon for flytende vindturbiner”, Masteroppgave, NTNU, juni 2013.
- [30] G. Chen, T. Y. G. Tay, E. Davies, “Electrodes and Charge Injection in Low-density Polyethylene”, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electr. Insul., Vol 8 No. 6; pp. 867-873, Dec. 2001*.
- [31] Nilsson, U. H., Borealis, A. B., Campus, A., “The use of model cables for evaluation of DC electrical properties of polymeric cable materials,” In JICABLE, 7th Conference (2007).

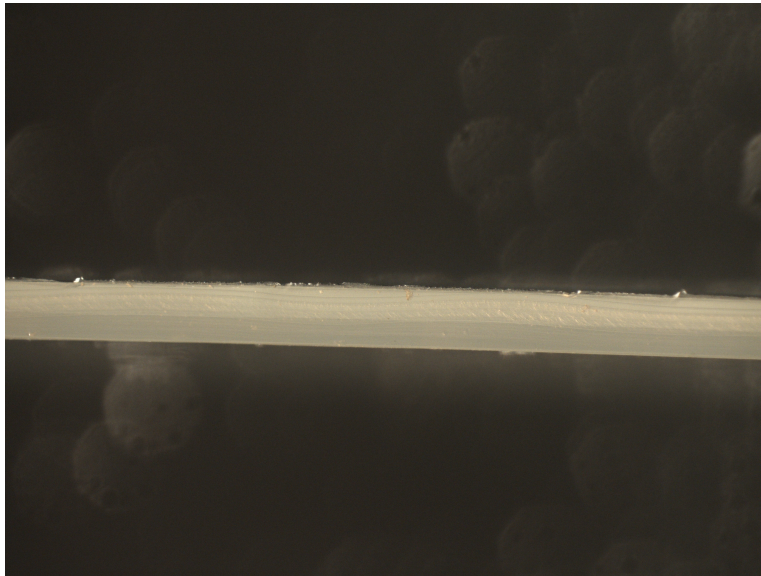
Tillegg A

Vedlegg

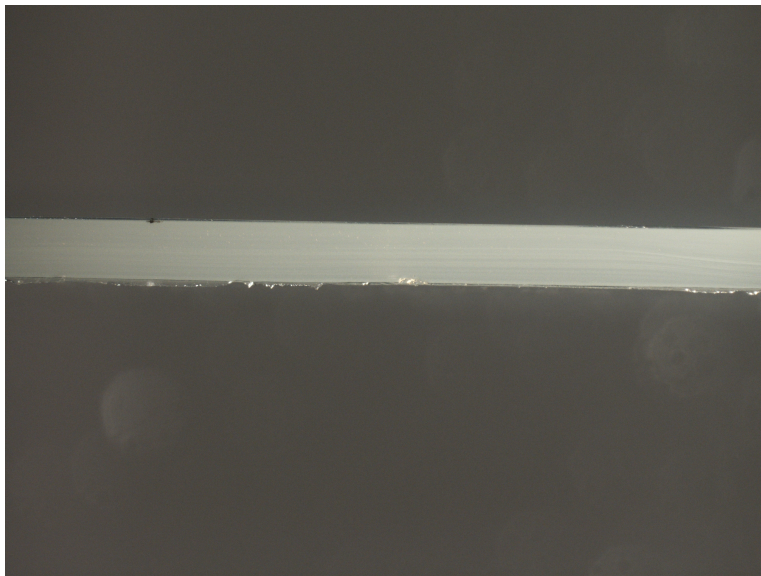
A.1 Tverrsnitt av flate testobjekter



Figur A.1: Testobjekt bestående av dobbelt kryssbundet AC-materiale og enkelt kryssbundet DC-materiale



Figur A.2: Testobjekt bestående av enkelt kryssbundet AC-materiale og enkelt kryssbundet DC-materiale.

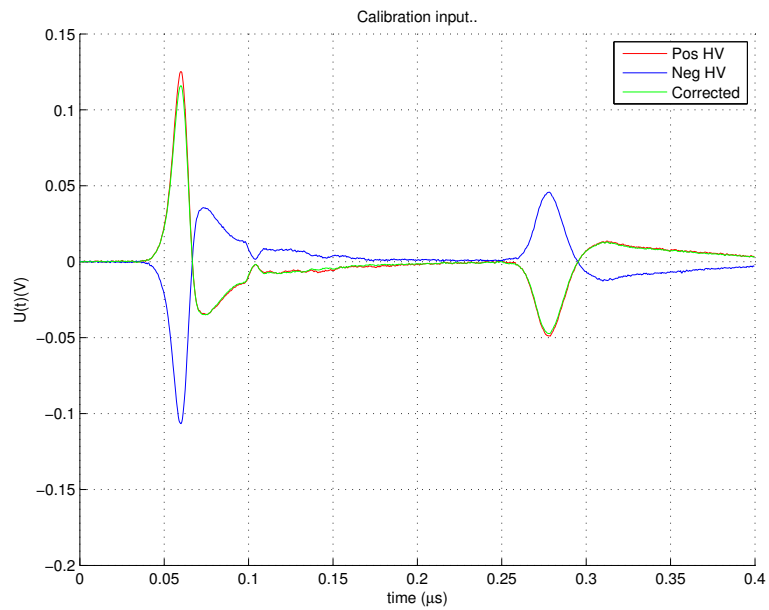


Figur A.3: Testobjekt bestående av to lag med enkelt kryssbundet DC-materiale.

A.2 Råsignaler

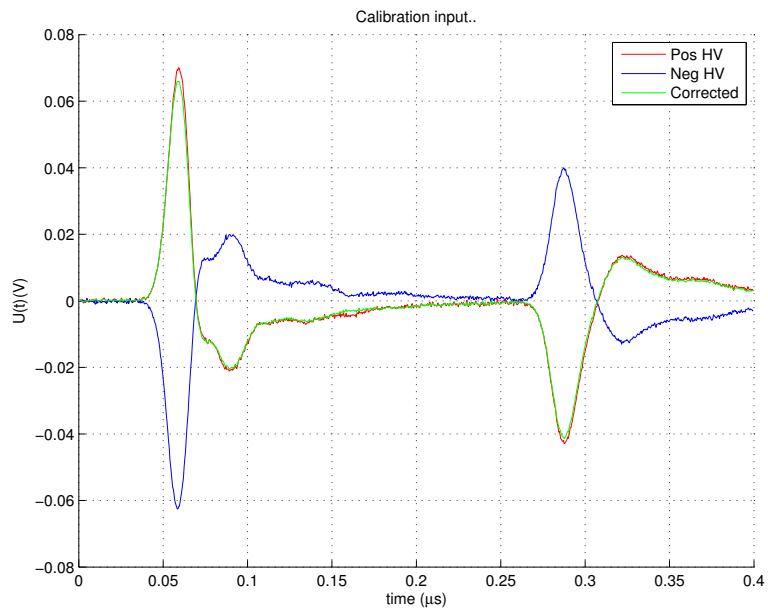
A.2.1 Flate testobjekt

Testobjekt #1 (20kV/mm)

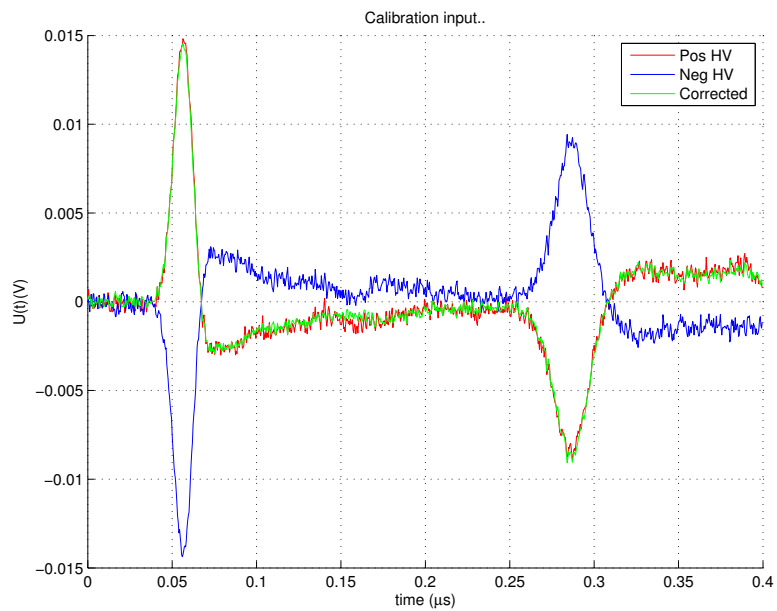


Figur A.4: kalibreringsignal #1

Testobjekt #2 (20kV/mm)

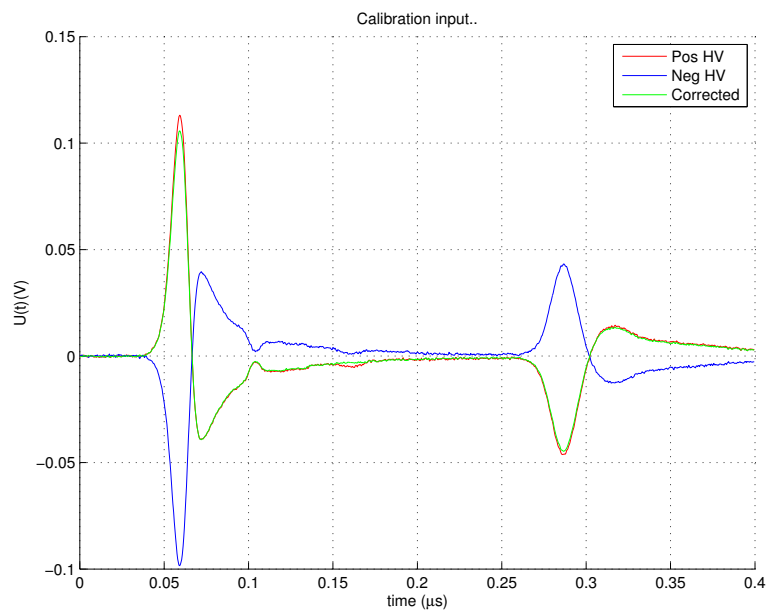


Figur A.5: kalibreringsignal #2

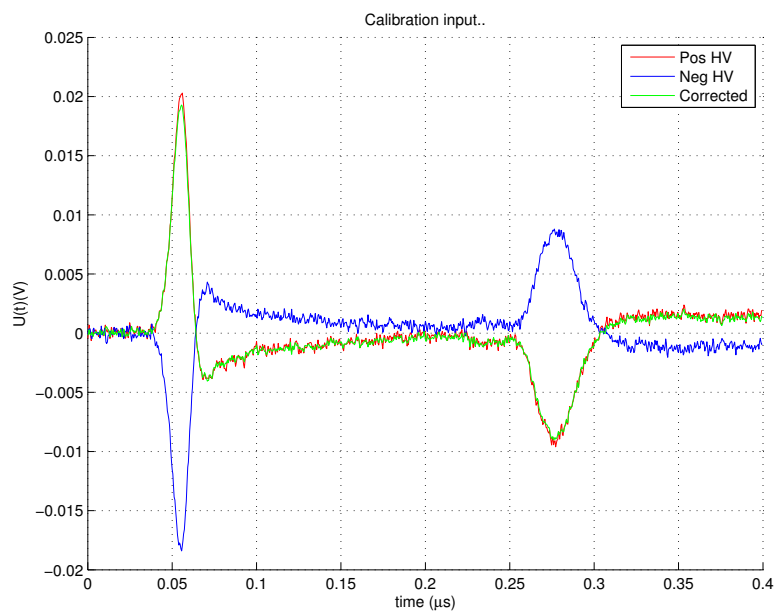
Testobjekt #3 (30kV/mm)

Figur A.6: kalibreringsignal #3

Testobjekt #4 (30kV/mm)

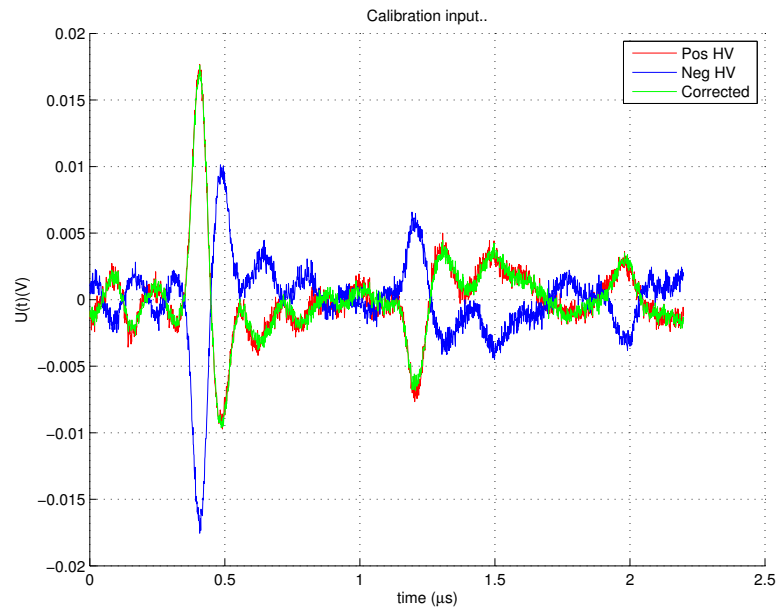


Figur A.7: kalibreringsignal #4

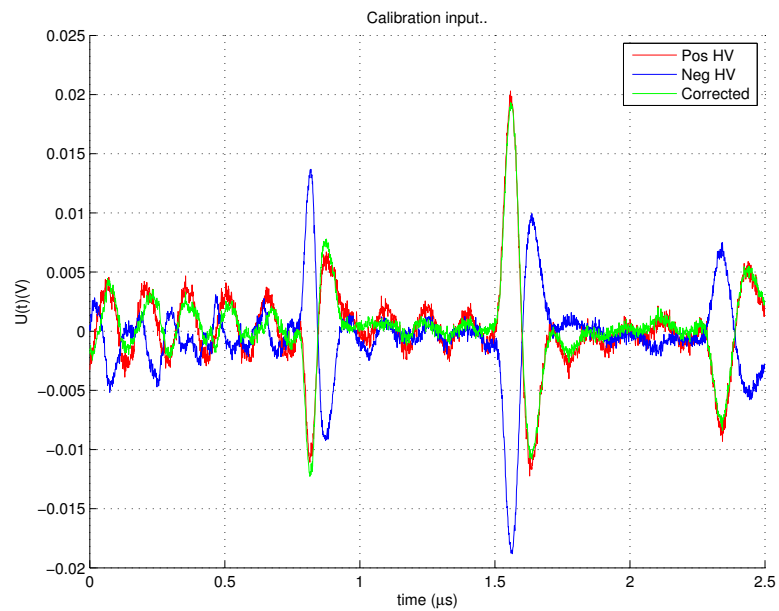
Testobjekt #5 (40kV/mm)

Figur A.8: kalibreringsignal #5

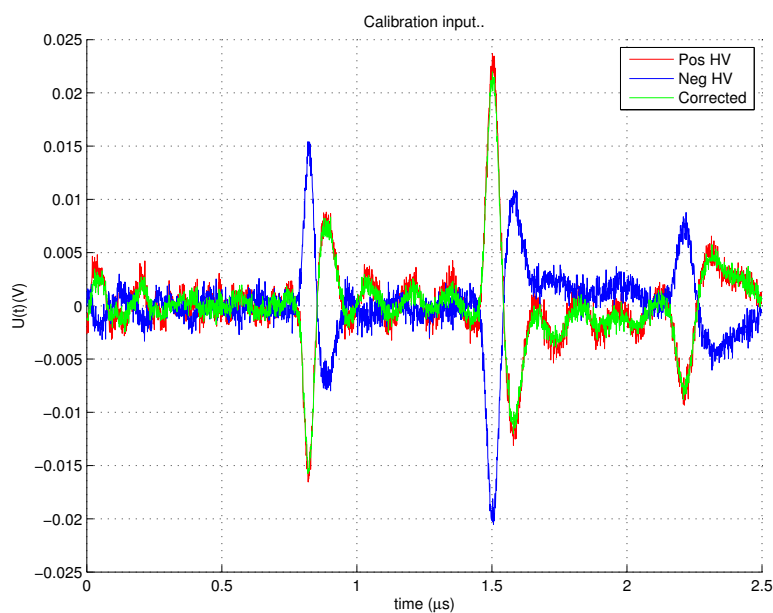
A.2.2 Miniatyrkabler



Figur A.9: kalibreringssignal #M1



Figur A.10: kalibreringssignal #M2

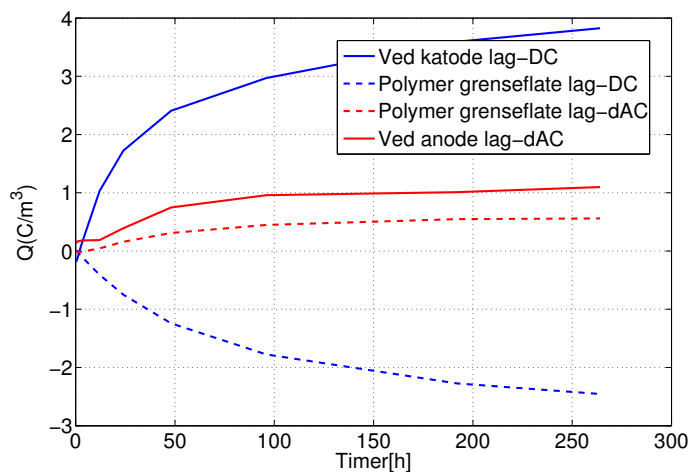


Figur A.11: kalibreringssignal #M3

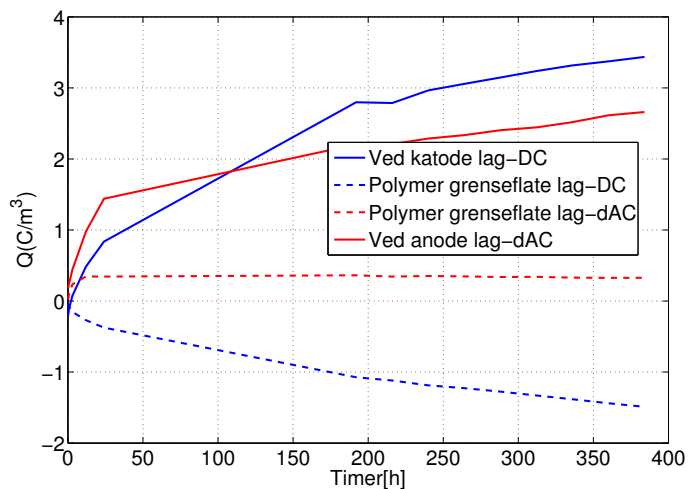
A.3 Lagdelte flateprøver av AC- og DC-materiale

A.3.1 Romladningsakkumulasjon over tid

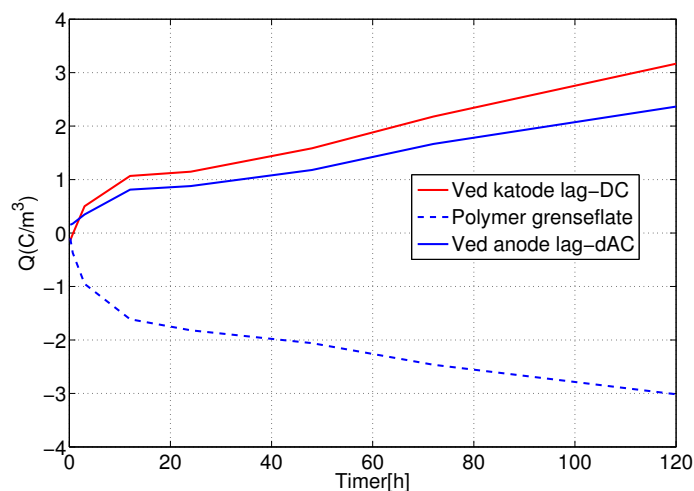
Måleseriene er for korte til å se en stabilisering og stopp i akkumulasjonen av ladninger. Unisont i alle måleseriene er en rask utvikling i begynnelsen av måleseriene (50-100 timer), deretter en mer langsom oppbygning av ladninger etter 100 timer i måleseriene ved 20 kV/mm og 40 kV/mm påtrykt gjennomsnittfelt.



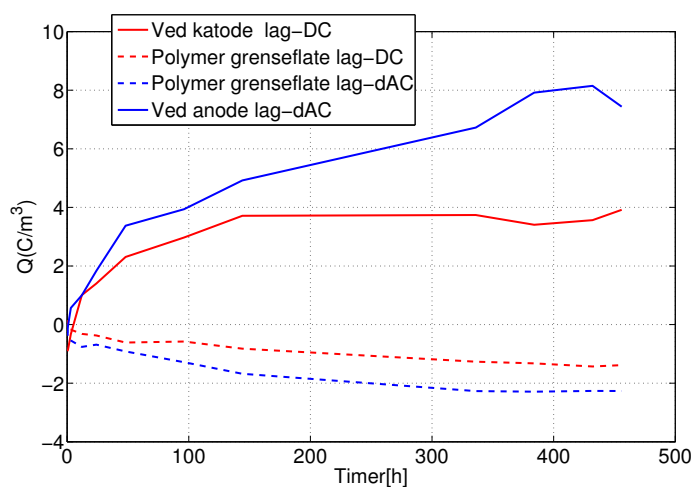
Figur A.12: Utvikling av romladninger i grenseflaten til elektrode-polymer og polymer/polymer etter polarisering ved påtrykt gjennomsnittsfelt på 20 kV/mm.



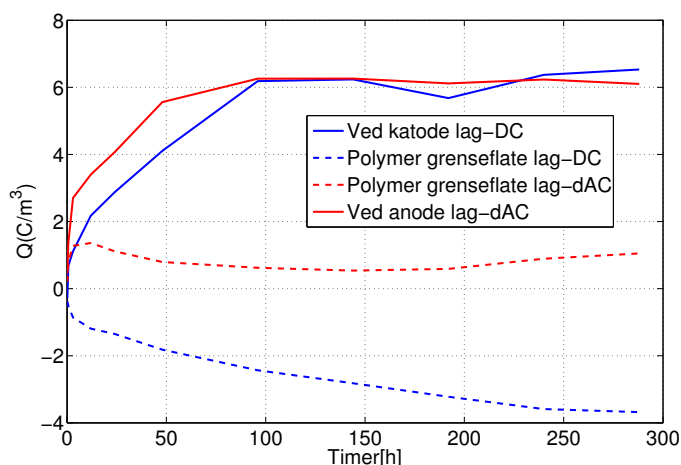
Figur A.13: Utvikling av romladninger i grenseflaten til elektrode-polymer og polymer/polymer etter polarisering ved påtrykt gjennomsnittsfelt på 20 kV/mm.



Figur A.14: Utvikling av romladninger i grenseflaten til elektrode-polymer og polymer/polymer etter polarisering ved påtrykt gjennomsnittsfelt på 30 kV/mm.



Figur A.15: Utvikling av romladninger i grenseflaten til elektrode-polymer og polymer/polymer etter polarisering ved påtrykt gjennomsnittsfelt på 30 kV/mm.



Figur A.16: Utvikling av romladninger i grenseflaten til elektrode-polymer og polymer/polymer etter polarisering ved påtrykt gjennomsnittsfelt på 40 kV/mm.

A.4 Flate testobjekt DC-materiale - feltendring

Feltendring på flate testobjekt bestående av DC-materiale. Målingene har blitt utført i prosjektoppgaven[25].

Tabell A.1: Maksimal feltreduksjon og feltøkning av tidligere målinger på testobjekt bestående av et lag DC-materiale[25]

Testobjekt	#F1	#F2	#F3
Maksimal feltreduksjon (ved katode)	19 %	20 %	19 %
Maksimal feltøkning (ved anode)	52,5 %	60 %	37,5 %
Gjennomsnittlig feltfordeling [kV/mm]	20	30	40

A.5 Ledningsevne

Måledata av ledningsevnen til DC-materialet.

Temp	40			60			80		
	10	15	20	10	15	20	10	15	20
Felt (kV/mm)	10	15	20	10	15	20	10	15	20
Pol_curr	2,11E-11	5,26E-11	8,38E-11	1,55E-10	2,87E-10	4,17E-10	2,25E-10	4,17E-10	6,00E-10
i/U	2,11E-12	3,508E-12	4,191E-12	1,5477E-11	1,9106E-11	2,0865E-11	2,2454E-11	2,7769E-11	2,9981E-11
Kapasitans	6,3E-11	6,3E-11	6,3E-11	6,3E-11	6,3E-11	6,3E-11	6,3E-11	6,3E-11	6,3E-11
e0*er	2,0355E-11	2,0355E-11	2,0355E-11	2,0355E-11	2,0355E-11	2,0355E-11	2,0355E-11	2,0355E-11	2,0355E-11
Sigma	6,8205E-13	1,1334E-12	1,3541E-12	5,0005E-12	6,1731E-12	6,7414E-12	7,2548E-12	8,9721E-12	9,6866E-12

Figur A.17: Måledata av ledningsevnen til DC-materialet.

A.6 Måletidsrom - LabView

Tabell A.2: Forhåndsinnstilling i *LabVIEW* for *voltage off* måletidspunkt.

Måletidspunkt [minutter]
5
10
15
40
80
100
120
150
180
240
300
360
420
480
540
600
660
720
780
840
960
1020
1080
1140
1200
1260
1320
1380
1440
2880
Deretter én måling per døgn

