

# Romladningsdistribusjon i XLPE HVDC kabelisolasjon for flytende vindturbiner

**Line Helland**

Master i energi og miljø

Innlevert: juni 2013

Hovedveileder: Frank Mauseth, ELKRAFT

Medveileder: Øystein Hestad, SINTEF

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet  
Institutt for elkraftteknikk



## **Problem description**

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

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

The project work is mainly experimental and will consist of measurements on both flat samples and cables. Primarily the DC behaviour is of interest.

Main supervisor: Frank Mauseth



## Forord

Denne oppgaven er avsluttende masteroppgave utført ved Norges tekniske-naturvitenskapelige universitet (NTNU), ved institutt for Elkraftteknikk våren 2013. Arbeidet en del av et femårig forskningsprosjekt *Høyspenning AC og DC Subsea Kabler til Offshore Vindparker og Overføringslinjer*, som er støttet av Norges forskningsråd.

Først vil jeg gjerne rette en stor takk til min hovedveileder Frank Mauseth og medveileder Øystein Hestad, for alltid å være tilgjengelige og tålmodige.

Jeg vil også takke Dag Solhjell, for hjelp til praktisk laboratoriearbeid, og Torbjørn Ve, hvis Matlabkoder har gitt meg hodebry, men gode resultater til slutt.

Til slutt vil jeg gjerne takke alle som har hjulpet meg underveis, dagene ville ikke vært de samme uten. Til vennene mine her på NTNU, for all latter. Til mine herlige medstudenter på kontoret. Til mine venninner, for all støtte underveis. Til min fine familie, for evigvarende oppmuntring. Til Rodrigo, for all inspirasjon og hjelp. Tusen takk!

Trondheim, 12. juni 2013



Line Helland



## Sammendrag

Offshore vindkraft er en av fremtidens mest lovende fornybare energikilder. For å tilkoble vindturbinene til land er HVDC en nødvendig og lovende løsning, grunnet avstand og nødvendig kapasitet. Kryssbundet polyetylen (PEX) er allerede et materiale benyttet i HVAC-isolasjon, og er tilsiktet å ta over markedsandelen til masseimpregnerte kabler.

En av hovedproblemene under drift, er at høy DC-spenning muliggjør romladning å akkumulere innad. Dette forårsaker endring i den elektriske feltfordeling, og påvirker derfor gjennomslagsmekanismer. Derfor er det interessant og viktig å undersøke og studere romladning og den elektriske feltfordelingen.

Denne masteroppgaven presenterer en detaljert analyse og diskusjon av resultater, oppnådd ved *Pulsed Electro-Acoustic* (PEA) målesystem, og utført på flate testobjekt og miniatyrkabel utsatt for DC-spenning. De flate testobjektene besto av kryssbundet polyetylen LE4253 med gullelektroder, og miniatyrkabelen besto av AC polyetylenmateriale LS4201S, med halvleder materialet LE0595 som katode og anode.

Måleserier for flate testobjekt ble utført med spenningsnivåer på 10, 15, 20 og 25 kV. Med målte tykkelser på 0,51 mm, korresponderer spenningsnivåene til elektrisk feltstyrker på 19,6, 29,4, 39,2 og 49 kV/mm. Måleseriene for miniatyrkabel ble gjort med spenningsnivåer på 30, 52,2 og 70 kV. Med en tykkelse på 1,75 mm, var korresponderende gjennomsnittlig elektrisk feltstyrke på 20, 30 og 40 kV/mm.

Basert på undersøkelsene ble følgende utvikling observert; for flate testobjekt viste alle romladningsprofilene like trender på grenseflaten mellom katode og isolasjon, der en endring i akkumuleringen fra homoladning til heteroladning ble observert raskere med høyere påtrykt elektrisk feltstyrke. I grensesjiktet mellom anode og isolasjon ble homoladning utviklet i samtlige måleserier, bortsett fra i måleserien med høyest påtrykt feltstyrke, der en lignende trend til polaritetsbytte i romladningsregionen utviklet med tiden. Den elektriske feltdistribusjonen viste maksimal feltforsterkning korresponderende til regioner med heteroladning. Maksimal feltforsterkning var 38 % av den påtrykte elektriske feltstyrken 19,4 kV/mm.

Måleseriene for samtlige miniatyrkabler viste akkumulering av homoladning i grensesjiktet mellom katode og isolasjon. Utviklingen av romladningsakkumuleringen i grensesjiktet ved anode var av mindre netto verdier, og viste indikasjon mot et bytte i romladningspolaritet og forskyvning av regionen. Elektrisk feltøkning oppsto økende mot katode. I bulk, for både flate testobjekt og miniatyrkabler, utviklet romladningsregioner med motsatt polaritet forskjøvet mot eller nært romladningsfeltene i grensesjiktene. En større feltforsterkning ble observert i miniatyrkabler til sammenligning med feltforsterkningen med en større netto romladningsakkumulering i flate testobjekt.

Trender i romladningsutviklingen for de forskjellige testobjekttypene ble sammenlignet og diskutert. På denne måten ble effekten av ulike nivå av påtrykt elektrisk felt på

romladningsutvikling sammenlignet og diskutert. Basert på presenterte resultater ble følgende konklusjoner trukket:

Romladning vil akkumulere i både flate testobjekt og miniatyrkabel. Med tiden vil romladning akkumulere nært elektrodene, og heteroladning vil resultere i en elektrisk feltforsterkning nær elektrodene. Basert på måleseriene for flate testobjekt, vil netto maksimal romladningsakkumulasjon ikke være avhengig av påtrykt elektrisk feltstyrke.



## Abstract

Offshore wind power is seen as one of the most promising renewable energy sources for the future. When connecting the wind turbines to shore, the use of HVDC-technology is a necessary and promising solution, due to the distances and capacity needed. Cross linked Polyethylene (XLPE) is already a material used in HVAC- insulation, and is intended to take over the marked share of mass-impregnated cables.

One of the considerable problems during operation, is that a high DC voltage applied on a polymer-insulating material allows space charge to accumulate within it. This causes alteration in the internal electric field, and thereby affects the breakdown mechanisms. Therefore it is interesting and important to investigate and study the space charge and electrical field distribution.

This thesis presents a detailed analysis and discussion of the obtained results from the Pulsed Electro-Acoustic (PEA) measurement system, and applied on flat test samples and miniature cable subjected to DC voltage. The flat test specimens consisted of cross linked polyethylene LE4253 with gold electrodes, and the miniature cables consisted of the AC-polyethylene material LS4201S, with the semiconducting material LE0595 as cathode and anode.

Measuring series for the flat test objects were done with voltage levels of 10, 15, 20 and 25 kV. With measured test species thickness of 0.51 mm, the voltage levels correspond to electric field strengths of 19.6, 29.4, 39.2 and 49.0kV/mm. The measuring series for the miniature cable were done with voltage levels of 30, 52.2 and 70 kV. With an insulation thickness of 1.75 mm, the corresponding average electric field strengths were 20, 30 and 40 kV/mm.

Based on the investigation following developments were observed; for the flat test objects, all of the space charge profiles showed similar trends on the interface between the cathode and insulation. A change in the accumulation from homo charge to hetero charge was observed faster with higher applied electric field strength. On the interface between anode and insulation all test series showed accumulation of homo charge, apart from the series with the highest applied field strength, a similar trend to change of polarity in the space charge region was evolving with time. The electric field distributions showed maximal field enhancement from the regions corresponding to hetero charge accumulation. Maximal field enhancement was 38% of the applied electrical field strength of 19.4kV/mm.

Measuring series for all of the miniature cables showed accumulation of homo charge on the interface between cathode and insulation. The evolution of the space charge accumulation on the interface of the anode was of a smaller net value, and indicated towards a change in the space charge polarity and displacement of the region. Electrical field enhancement occurred increasingly to the cathode. In bulk, in both flat test objects and miniature cable, evolved space charge regions with opposite polarity displaced against - or close by the space charge fields on the interfaces. A greater field enhancement was observed in the miniature cables in comparison to the larger net accumulation of space charge in flat specimen.

Patterns in the space charge development of the different types of test specimens were compared and discussed. In this way the effect of different levels of applied electric field on space charge behaviour was investigated. Based on presented results, following conclusions were made:

Space charge will accumulate in both flat test object and miniature cable. With time the space charge will accumulate close to the electrodes, and the hetero charge will result in an electric field enhancement by the electrodes. Based on the measurement series on flat test objects, net maximum space charge accumulation will not be dependent on the applied electric field strength.

## Innholdsfortegnelse

Problem description .....	i
Forord .....	iii
Sammendrag .....	v
Abstract .....	vii
1. Innledning.....	1
1.1 Bakgrunn og motivasjon.....	1
1.1.1 Offshore vind.....	1
1.1.2 HVDC overføring.....	2
1.2 Arbeid .....	3
1.3 Relasjon til spesialiserings- og forskningsprosjekt .....	4
Teoretisk bakgrunn .....	5
1.4 Dielektrisk materiale .....	5
1.5 Molekylærstruktur til Polyetylen .....	5
1.5.1 Kryssbinding .....	6
1.6 Romladningsformasjon og akkumulasjon .....	6
1.6.1 DC konduktivitet.....	7
1.6.2 Konduktivitetsmekanismer .....	8
1.6.3 Ladningsinjeksjon .....	9
1.6.4 Mer om feller.....	10
1.6.5 Romladning .....	11
1.6.6 Polariseringsmekanismer .....	13
1.6.7 Effekt av romladninger.....	14
1.7 PEA målemetode.....	15
1.7.1 Kalibrering .....	16
1.7.2 Akustisk bølger, refleksjon og transmisjon .....	16
1.7.3 Analyse av resultater .....	17
1.7.4 Posisjon av elektroder .....	18
2. Metodikk .....	19
2.1 Fremstilling av flate testobjekt.....	19
2.1.1 Ekstrudering av Polyetylen.....	19

2.1.2	Kryssbinding av Polyetylen.....	19
2.1.3	Kondisjonering.....	20
2.1.4	Ionesputting av gull.....	20
2.1.5	Måling av tykkelse.....	20
2.2	Modifisering av miniatyrkabel.....	21
2.3	Oppsett for målinger.....	22
2.3.1	Måling på flate testobjekt.....	22
2.3.2	Måling på miniatyrkabel.....	23
3.	Resultater.....	25
3.1	Flate testobjekt.....	25
3.1.1	Testobjekter #A, #B og #C.....	25
3.1.2	Testobjekt #1 – 19,6 kV/mm.....	26
3.1.3	Testobjekt #2 – 29,4 kV/mm.....	30
3.1.4	Testobjekt #3 – 39,2 kV/mm.....	34
3.1.5	Testobjekt #4 – 49,0 kV/mm.....	38
3.2	Miniatyrkabel.....	42
3.2.1	Måleserie #K1 – 20 kV/mm.....	43
3.2.2	Måleserie #K2 – 30 kV/mm.....	47
3.2.3	Måleserie #K3 – 40 kV/mm.....	49
4.	Diskusjon.....	51
4.1	Flate testobjekt.....	51
4.2	Miniatyrkabel.....	54
4.3	Feilkilder.....	55
4.3.1	Flate testobjekt.....	55
4.3.2	Miniatyrkabel.....	56
5.	Konklusjon.....	57
6.	Forslag til videre arbeid.....	59
	Referanser.....	61
	Vedlegg A.....	63

## 1. Innledning

### 1.1 Bakgrunn og motivasjon

En av nåtidens største utfordringer er løsningen av globale energi- og klimautfordringer. Den økende etterspørselen av elektrisitet, kombinert med nødvendigheten av å redusere CO<sub>2</sub>-utslipp, krever et høyt ambisjonsnivå for energiforskningen. Langsiktig, målrettet global og lokal satsning på klimavennlige energiteknologier, kombinert med grønnere bruk av fossile brennstoff er avgjørende dersom man skal nå FN's to-graders mål.

#### 1.1.1 Offshore vind

Offshore vindenergi er sett på som en av de mest lovende fornybare energikildene for fremtiden. I følge den Europeiske Unions mål EU2020, har medlemslandene som målsetning å bygge ut 43 GW, hvilket er mer en ti ganger så mye som dagens kapasitet [1]. I tillegg til å være en del av løsningen på Europas energi- og klimadilemma, vil offshore vindkraft kunne gi rimelig elektrisitet, redusere importavhengigheten, skape nye arbeidsplasser og gi tilgang til en evigvarende grønn energikilde.

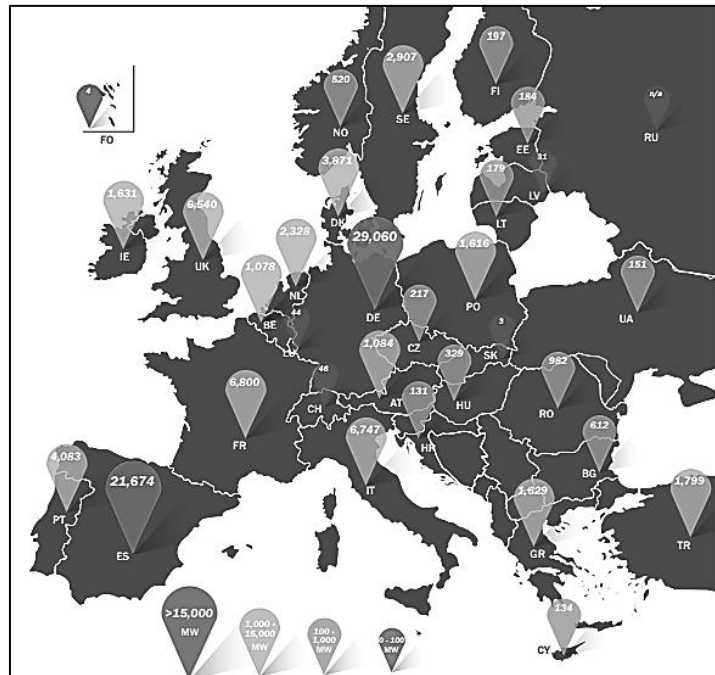
Fordelene med offshore vindturbiner er mange. Vindhastigheten er høy og installert effekt er større enn fra vindmøller på land. Vindparkene kan lokaliseres nært konsumområdene uten at plasseringen er til visuell sjenanse. Det er likevel flere utfordringer for fremtiden; økte aktiviteter på havet gir opphav til konflikter med andre sektorer som båttransport, fiskeri og turistnæringen. I tillegg vil utbyggingen av offshore vindkraft kreve ny nettinfrastruktur som vil overlappet grenser internasjonalt, det er fortsatt ingen internasjonal strategi for planleggingen av offshore nettinfrastruktur.

I midlertidig er offshore vindenergi sett som en nøkkelteknologi, og norsk industri og forskning er i tet i utviklingen av eksempelvis nettintegrasjon. Hele Europa har som mål å bli ledende innen neste generasjons offshore vindturbiner, bærestruktur og infrastruktur, men teknologien er fortsatt umoden. For å sette det i perspektiv, er offshore vindteknologi der pålandsvindturbiner var i 1990 [2].

Per dags dato er det ingen offshore vindparker i Norge. En mulighetsstudie gjennomført for Lyse viser at det fortsatt ikke er samfunnsøkonomisk gunstig å investere i offshore vindkraft i Norge, men potensialet for vindkraft på norsk sokkel er enormt. Når teknologien er moden og kostnadene er redusert til et konkurransedyktig nivå, er målet om en totalproduksjon i Norge på 20 TWh<sup>1</sup> i 2020 et realistisk mål.

---

<sup>1</sup> Inkluderer produksjon fra vindturbiner på land.



Figur 1-1 - Vindkraft installert i Europa ved avslutningen av 2011 [3].

### 1.1.2 HVDC overføring

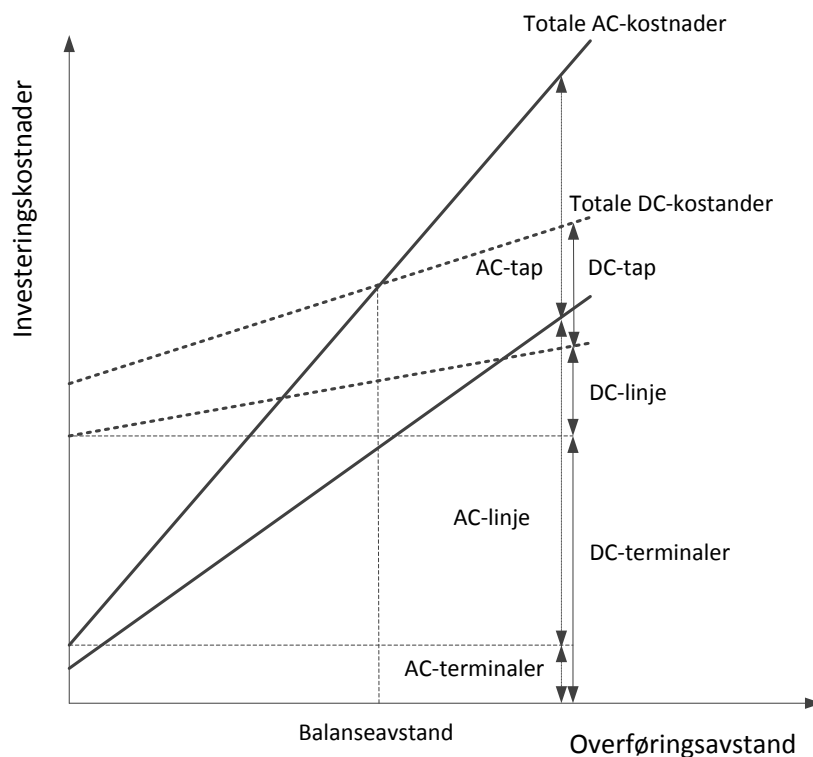
Ingen offshore vindkraft kan leveres uten elektrisk forbindelse til konsumet på land. Derfor vil behovet for offshore-kabler øke med utviklingen.

I et AC-system er spenningskonvertering enkelt. En AC-transformator gir høye spenningsnivå, har lave tap og krever relativt lite vedlikehold. I tillegg er en trefase synkrongenerator overlegen i forhold til en DC generator i alle aspekter. Av disse grunnene ble AC teknologi tidlig foretrukket i utviklingen av elektriske kraftsystemer, og har i lengre tid blitt ansett som eneste anvendbar teknologi for generering, overføring og distribuering av elektrisk energi.

Likevel er det ulemper som kan tiltvinge bruken av DC-teknologi. Ved overføring av elektrisk energi på havbunnen, avhengig av nødvendig overføringskapasitet, systemets frekvens og tapsevaluering, vil det for lengre kabelforbindelser i de fleste tilfeller kun være mulig med HVDC. Mulig overføringskapasitet for AC begrenses til maksimum mellom 40 og 100 km, hovedsakelig begrenset av ladestrømmen.

Mulighetsstudier gjennomføres for å avgjøre hva slags system som er mest gunstig. Figur 1-2 viser en generell kostnadsberegning for henholdsvis HVAC og HVDC-overføring, og tar i betraktning investeringskostnader samt tapsekostnader. DC-kurven er ikke like bratt som AC-kurven, da linjekostnadene per kilometer er betraktelig lavere. For lengre avstander må reaktiv effektkompensering tas med i beregningen for AC-linjer.

Balanseavstanden vil være avhengig av flere faktorer som landspesifikke kostnadselementer og rentesatser for prosjektfinansiering [4].



Figur 1-2 - Totale kostnader per avstand [4].

Bruken av HVDC-teknologi i offshore nett er attraktivt fordi det gir muligheten for kontrollen tiltrengt for overføringen av vindkraft, og ved forbedret infrastruktur muliggjøres elektrisitetshandel, selv mellom forskjellige synkrone soner.

Selv om all teknologi for offshore nettverk allerede eksisterer i prinsippet, er det flere aspekter ved HVDC-teknologi som behøver utvikling for å oppnå nødvendig teknisk modenhet [2], blant annet i kabelindustrien.

## 1.2 Arbeid

Kryssbundet polyetylen (PEX) er et materiale som allerede er benyttet som isolasjon i HVAC sjøkabler, og er tiltenkt å ta over den dominerende markedsandelen til masseimpregnerte HVDC-kabler. PEX gir lettere og mer kompakte kabler, er lettere å skjøte enn masseimpregnerte kabler, tåler høyere driftstemperaturer, i tillegg til å eliminere miljøproblematikken forbundet med lekkasje fra oljen i masseimpregnerte kabler.

I forbindelse med offshore vindturbiner med anvendt HVDC-teknologi, er det blant annet viktig å kartlegge mekanismer som kan ha påvirkning på aldringsprosessen i kabelisolasjonen. Over lengre driftsperioder vil romladning akkumuleres i isolasjonen, og påvirke den elektriske feltfordelingen. Romladninger kan forårsake lokale feltforsterkning, som ved polaritetsbytte vil kunne føre til overslag. Det er også antatt å kunne påvirke andre aldringsmekanismer, som

eksempelvis elektriske trær og partielle delutladninger. På bakgrunn av dette har eksperimentelle undersøkelser blitt gjennomført på flate testobjekt og miniatyrkabel.

Denne oppgaven er organisert som følgende; litteraturstudiet i kapittel 2 har som formål å gi en generell forståelse for teorien bak presenterte resultater. I kapittel 3 forklares utstyr og metodikk benyttet i laboratoriearbeidet, resultatene fra gjennomførte måleserier er gjengitt i kapittel 4, og diskusjonen presenteres i kapittel 5. Avslutningsvis er konklusjonen i kapittel 6.

### **1.3 Relasjon til spesialiserings- og forskningsprosjekt**

Denne masteroppgaven er en videreføring av spesialiseringsprosjektet, som ble gjennomført høsten 2012. Arbeidet i sin helhet er en del av et større forskningsprosjekt ved Sintef og NTNU, der flere lignende forsøk har vært gjennomført de siste tre årene. Basert på erfaring fra tidligere, har laboratorieoppsett og databehandling vært i kontinuerlig forbedring for å nå nye og pålitelige resultater.



## Teoretisk bakgrunn

Offshorekabler er avhengig av lang og driftssikker levetid, og det er derfor viktig å kartlegge alle mekanismer som kan ha innvirkning. Generelt vil polymerer utsatt for HVDC-spenning tendere til å bli ladet, og ladninger kan akkumuleres i materialet over lengre tid. Konduktivitet og lagring av ladninger er avhengig av en rekke materialparametere, som krystallinitet, kryssbinding og tilsetningsstoffer. Dette kapitlet har som formål å gi en generell forståelse for bakgrunnen for arbeidet, samt diskusjonen av presenterte eksperimentelle resultater.

### 1.4 Dielektrisk materiale

Et dielektrikum er generelt betraktet som et ikke-ledende eller et isolerende materiale, teoretisk vil elektriske felt kunne etableres, men det vil ikke lede elektrisk strøm [5]. I virkeligheten vil dielektrika til en viss grad muliggjøre konduktivitet; bevegelse av ladninger [6]. I denne oppgaven benyttes en semikrystallin polymer, Polyetylen (PE), som dielektrika.

Polymerer benyttes sjelden i ren form, men tilsettes komponenter for å fremme egenskaper, samt vil inneholde reststoffer fra produksjonen.

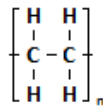
*Katalysatorer* benyttes i produksjonsprosessen. Ferdig produkt vil inneholde restprodukter etter disse. Katalysatorer ved kryssbindingsprosessen faller innenfor denne kategorien.

*Tilsetningsstoffer*, tilsettes i små konsentrasjoner (<10 %), forandrer ikke strukturen, men fremmer egenskaper som varmebeskyttelse og/eller for å forhindre oksidasjon ved bruk.

*Blandingsmaterialer*, benyttes i større konsentrasjoner (10-70 %), og omfatter fyllstoff og mykner [7].

### 1.5 Molekylærstruktur til Polyetylen

PE er en type homobunden polymer, et termoplastisk<sup>2</sup> materiale med repeterende struktur som vist i Figur 0-1.

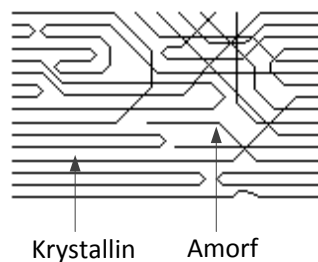


Figur 0-1 – Polyetylen

I blant oppstår sidekjeder som vil forstyrre den regelmessige formen på hovedmolekylet, og disse parallelle kjedene gir krystalline regioner i polymeren. I andre deler av polymeren vil kjedene ligge vilkårlig i forhold til hverandre og skape amorfe regioner, som nærmere illustrert i Figur 0-2. I tillegg til strukturell uorden vil uønskede kjemiske urenheter akkumuleres i de

<sup>2</sup> Termoplast smelter ved oppvarming og kan enkelt prosesseres ved støpning, – eller ekstruderingssteknikker [4].

amorfe regionene. De kjemiske urenheterne kommer fra tilsetningsstoffer og forurensninger, og er ikke til å unngå i noe materiale. Disse faktorene er viktige for formasjonen av romladning, og vil forklares nærmere siden. Andel krystallinitet påvirker materialkarakteristikken, blant annet tettheten<sup>3</sup>, som er avgjørende for ledningsevnen. Amorfe regioner vil ha en bedre ledningsevne enn de krystallinske, slik at spesifikk resistivitet til polyetylen er avhengig av andel krystallinitet<sup>4</sup> [6].



Figur 0-2 - Strukturen til en polymer med amorfe og krystallinske regioner

### 1.5.1 Kryssbinding

Kryssbundet Polyetylen (PEX) kan oppnås ved at materialet oppvarmes under høyt trykk, hvorpå kjemiske (kryss)bindinger oppnås mellom molekyllkjedene. Dette vil i prinsippet gi et stort sammenhengende molekyl med redusert bevegelighet. Formålet med kryssbinding er å heve det opprinnelige smeltepunktet, slik at det er bedre egnet ved høyere driftstemperaturer, samtidig som at dielektriske egenskaper og resistivitet holder seg tilnærmet uforandret [6, 8].

## 1.6 Romladningsformasjon og akkumulasjon

Romladning er lokaliserte, akkumulerte ladninger av en polaritet i en region i materialet som ikke er kompensert av en lik konsentrasjon av motsatt polaritet [7]. Ladningene er elektroner, hull og/eller ioner som er tilstedeværende i isolasjonsmaterialet. Ved påtrykket spenning, vil konduktiviteten til materialet muliggjøre flyt av elektriske ladningsbærere. Dersom flyten inn i en region er forskjellig fra flyten ut av regionen, vil det akkumuleres som romladninger [6]. Akkumulert romladningen vil forårsake lokal elektrisk feltendring [7], og kan påvirke materialets ytelse [6, 9].

---

<sup>3</sup> Tettheten til polyetylen vil øke med andel krystallinitet, og dette har påvirket terminologien: polyetylen med omkring 55 % krystallinitet defineres som Lav Densitet Poly Etylen: LDPE. Polyetylen med omkring 90 % krystallinitet kalles Høy Densitet Poly Etylen: HDPE [2].

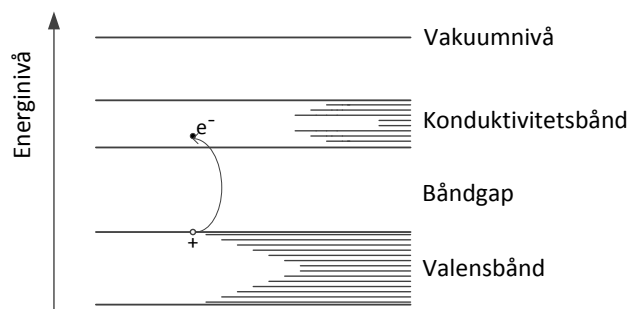
<sup>4</sup> Krystallinske regioner i polyetylen har, i følge teorien, høyere spesifikk resistivitet enn rene isolatorer. Rene isolatorer har en resistivitet på  $10^{11}$  til  $10^{20}$   $\Omega\text{m}$ , hvorpå krystallinske regioner har på minimum  $10^{20}$   $\text{m}\Omega$  og vil derved gi lite bidrag til konduktiviteten i polymeren [2].

### 1.6.1 DC konduktivitet

Konduktivitet er transport av ladninger gjennom et materiale, og strøm er et mål på transportraten. Konduktiviteten til et materiale er en hovedfaktor i påvirkningen av elektrisk feltdistribusjon i HVDC kabelisolasjon. Energibåndteori kan til en viss grad forklare konduktiviteten i polymerer.

I et materiale beveges elektroner i separate baner om atomkjerner. I valensbåndet vil elektronene ikke kunne bidra til ledningsevnen, men kan beveges mellom ledige nivåer i samme bånd [10]. Om valensbåndet er fulltallig må elektronet oppnå tilstrekkelig energi for å hoppe til et ledig nivå i neste bånd, konduktivetsbåndet<sup>5</sup>. Elektroner i konduktivetsbåndet har tilstrekkelig energi til å forlate atomer og kan genere strøm [7, 10].

Teorien er illustrert i Figur 0-3, og er gjeldende for elektroner og hull.



**Figur 0-3 – Energibåndteori beskrevet ved Niels Bohrs atommodell. Båndgapet, også kalt det forbudte gap, vil ikke inneholde elektroner da elektroner ikke kan oppnå energi i denne regionen.**

Hvert molekyl i en krystallin region har sitt eget energibånd, hvor et elektron kan beveges langs molekylet. I amorfe regioner vil mangelen på orden hindre båndformasjon, men en distribusjon av energinivåer kan oppstå som følge av polariserings- og relaksasjonseffekter [10].

Den elektriske ledningsevnen til et materiale kan beskrives ved:

$$\sigma_i = n_i e_i \mu_i \quad (1)$$

hvor  $n_i$  er konsentrasjonen av ladningsbærertype,  $e_i$  er elektrisk ladning og  $\mu_i$  er mobilitet. Generelt vil det være flere typer ladningsbærere, i litteraturen er det likevel vektlagt at det ofte domineres av en type; i PE hovedsakelig elektroner [5-7, 11]. Den totale konduktiviteten for N typer ladningsbærerbidrag er beskrevet ved:

<sup>5</sup> Ledningsevnen vil være avhengig av størrelsen på bandgapet, angitt i elektronvolt eV. 1 eV ~ 100 kJ per mol. En leder har et smalt båndgap < 0,2 eV, en isolator har et bredt båndgap > 2 eV [2].

$$\sigma = \sum_i^N \sigma_i = \sum_i^N |n_i e_i \mu_i| \quad (2)$$

### 1.6.2 Konduktivitetsmekanismer

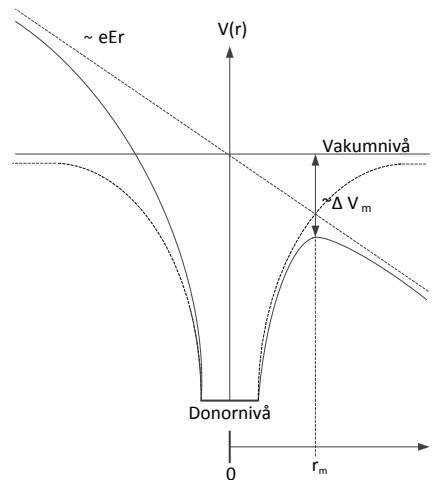
Av naturen til semikrystallinske materialer som PE vil de elektriske konduktivitetsmekanismene være komplekse. Konduktiviteten kan være avhengig av prosessering av materialet og termisk historie [11], i tillegg må elektroner krysse amorfe og krystallinske regioner som oppfører seg forskjellig i forhold til transportmekanismer [9]. Som konsekvens er det derfor vanskelig å avgjøre hvilke mekanismer som er aktive.

Ladningstransport kan klassifiseres ved type ladningsbærer; *ionisk transport* og *elektronisk transport*. Typen ladningsbærer som er ansvarlig for ledningsevnen er avhengig av både materialets kjemiske og fysiske komposisjon, samt frekvensen til påtrykket felt og temperatur. I tillegg vil elektrisk felt, elektrodemateriale og elektrodekonfigurasjon kunne påvirke [6].

Ioner kan oppstå i bulk i isolasjonen og ved grensesjiktet mellom elektrode og isolasjon, eller være tilstede i materialet grunnet urenheter. Ionene oppstår på kontaktflaten grunnet elektrolytisk dissosiasjon, ved dekomponering av isolasjons-, eller elektrodemateriale og ved ionisering av tilsetningsstoffer og urenheter. Ionisk ledningsevne er massetransport, og selv om noen ioner allerede eksisterer i materialet, er ionisk ledning avhengig av at ioner oppstår over tid. Man skiller mellom *indre ionisk ledning* og *ytre ionisk ledning*. Indre ionisk ledning forårsakes ved at et hovedmolekyl eller en sidegruppe spaltes, fulgt av et proton og/eller elektron, og forflyttes igjennom materialet. Ytre ionisk ledning forårsakes av ioner som ikke er en opprinnelig del av polymeren, og kan trenge igjennom strukturen [6]. Massetransport er direkte bevis på ionisk ledning, men da strømmen i en isolasjonspolymer er liten, er dette vanskelig å måle [9].

*Elektronisk ledningsevne* inkluderer transport av elektroner og hull innad i molekylstrukturen. Disse er de to hovedfaktorene som påvirker ledningsevnen i polymerer, men intermolekylær transport er normalt sett svak, grunnet svake bånd mellom polymergrenene [11]. Imellom molekylene og i materialujevnheter kan elektroner og hull bli fanget i potensialbrønner, omtalt som feller. Feller for elektroner er akseptorer eller ioniserte donorer, og for hull, donorer eller ioniserte akseptorer. For å frigjøres fra en felle må ladningsbæreren overkomme en potensialbarriere. Når en ladning er frigjort, kan den bli tiltrukket neste felle. Ved ladningers bevegelse medføres det et polariseringsfelt, dette kan antas å være en kvasipartikkel, som refereres til som et *polaron*[5]. En mekanisme for elektron eller hull-transport er *termisk aktivert hopping*, hvor ladning frigjøres ved å oppnå tilstrekkelig energi fra termiske fluktuasjoner, og dermed overkommer potensialbarrieren. Ved høye elektriske felt kan potensialbarrieren reduseres beskrevet ved *Poole-Frenkel mekanismen* [5], illustrert i Figur 0-4. En alternativ mekanisme er beskrevet ved kvantemekanikk som *tunneling*. Dersom det kun eksisterer en smal barriere, typisk mindre enn 1 nm, vil sannsynligheten for at den eksisterer

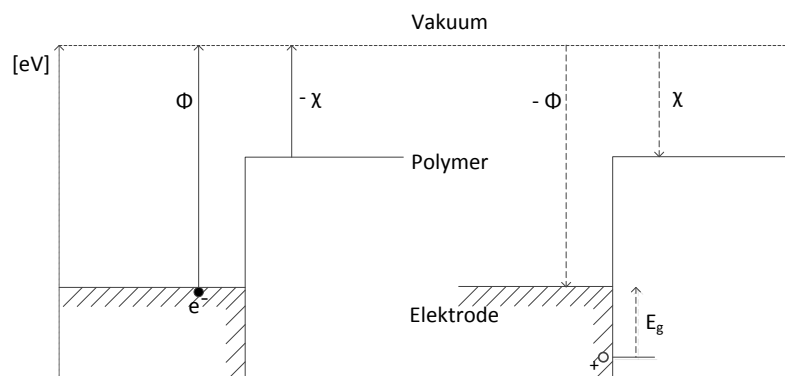
på motsatt side være tilstede. På denne måten kan elektroner «oppstå» på motsatt side av barrieren ved tunnelingmekanismen [6].



Figur 0-4 - Elektrisk feltassistert reduksjon av potensialbarriere.

### 1.6.3 Ladningsinjeksjon

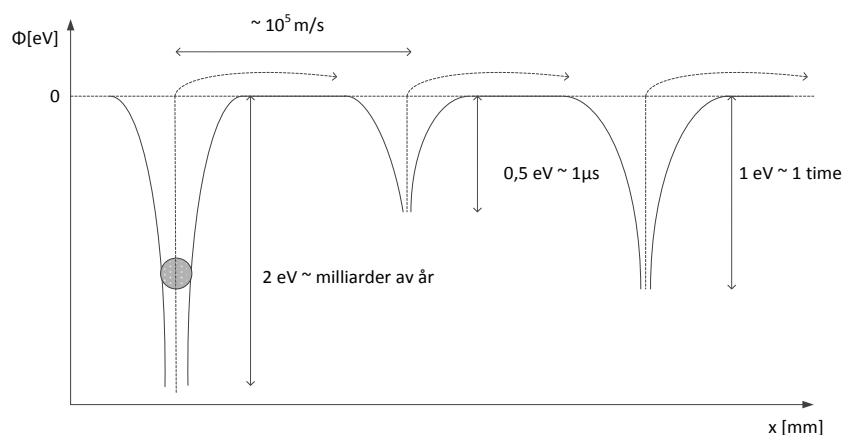
For at migrasjon av elektroner eller hull skal være mulig mellom elektrode og isolasjon må de overkomme en potensialbarriere, hvor formen på barrieren vil være avhengig av kjemiske og fysiske defekter på kontaktflaten mellom metallet og isolasjonen. Høye elektriske felt kan redusere både høyde og bredde på barrieren [7]. Reduksjonen gjør det mulig for et elektron å overkomme grenseflaten ved tunnel-mekanismen, omtalt som *Fowler-Norheim injeksjon*, eller oppnå tilstrekkelig energi for å overkomme barrieren, omtalt som *Schottky injeksjon*[10]. Mekanismene er basert på et enkelt bånddiagram [7], som vist i Figur 0-5.



Figur 0-5 - Bånddiagram for potensialbarrieren ved katoden mellom elektroden og isolasjonen. For at et elektron skal kunne bli injisert fra elektrode til dielektrika må den overkomme en barriere på  $\Phi - \chi$ , et hull vil bli ekstrahert ved å overkomme en barriere tilsvarende  $E_g - \Phi + \chi$  [6].

### 1.6.4 Mer om feller

I polymerer er det liten sannsynlighet for at ladninger beveges fritt, men vil ved transportmekanismer beveges mellom feller. Feller oppstår som følge av uregelmessigheter innad i materialstrukturen, og kan beskrives som lokale energitilstander, i stand til å fange ladningsbærere. Ladningene blir værende avhengig av dybden på fellen, og vil følgelig ikke kunne bidra til ledningsevnen. Dybden defineres som energien som kreves for å frigjøre ladningsbæreren [7], og er illustrert sammen med tidsperspektivet i Figur 0-6[9].



**Figur 0-6 - Figuren viser et eksempel på tidsperspektivet i forhold til feller og konduktivitet; transporten av ladningsbærere vil være av liten tid i sammenligning med tid tilbrakt i feller. Transporten av ladningsbærere er definert av tettheten og dybden på feller. Dersom mange overfladiske feller er tilstedeværende kan man forvente seg en god ledningsevne i materialet, dypere feller gir dårligere ledningsevne [12].**

Elektronfeller kan gi opphav til to viktige fenomener. Når et elektron er fanget, vil den forme en negativt ladet homoladning nær katoden som vil gi en intern elektrisk feltfordeling motsatt av det påtrykte feltet. Dette kan redusere det effektive feltet og raten av elektroninjeksjon. Denne romladningen kan også øke det elektriske feltet mot anoden, som av konsekvens kan bytte til hullinjeksjon. Et annet fenomen kan oppstå i forbindelse med fangingen av elektroner. I overgangen fra øvre til nedre energinivå, vil et energikvantum lik differansen mellom nivåene utvikles [5]. Dette er antatt å kunne ha innvirkning på elektrisk aldring av kabelisolasjon, og vil bli beskrevet nærmere i kapittel 2.3.7.

I tillegg til tidligere nevnte felletyper, er også selvfangende feller tenkt å eksistere i polymerer. Dersom feltet til et fritt elektron påvirker materialstrukturen, slik at det forårsaker et lokalt potensialfall, kan ladningen fanges av seg selv. Også denne typen felle er antatt å være forårsaket av tilsetningsstoffer i polymeren.

Generelt kan man si at de dypeste fellene er de som er oppstått grunnet tilsetningsstoffer [6]. I PE kan både dype og overfladiske feller være tilstedeværende, der varierende dybder på 0,1 – 1,4 eV har blitt rapportert [11, 12].

### 1.6.5 Romladning

Generelt vil polymerer utsatt for HVDC spenning tendere mot å bli ladet, og ladninger kan akkumuleres i materialet over lengre tid. Disse ladningene kan være forsynt av elektrodene eller bli generert i bulk i polymeren [11].

Ladningsbærere former romladning som følge av flere prosesser; Orientering av dipoler, injeksjon eller ekstraksjon av ladninger fra elektrodene når DC feltet er over 10 kV/mm, og ionisering av urenheter [13]. Ladninger av samme polaritet som nærliggende elektrode vil redusere det elektriske feltet, men øke feltet i bulk. Omvendt vil ladninger av motsatt polaritet redusere feltet i bulk, men øke feltet nær elektrodene [10, 14].

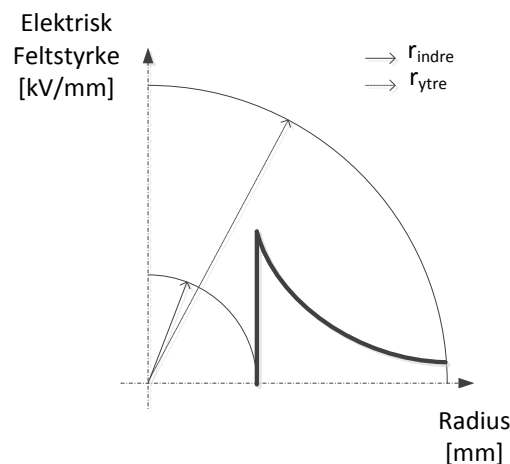
Den elektriske feltfordelingen,  $E_0$ , ved påtrykt DC spenning vil være homogen dersom romladning ikke er tilstede [8]:

$$E_0 = \frac{U}{d} \quad (3)$$

Hvor  $U$  er påtrykt spenning og  $d$  er diameteren. Ved kabelkonfigurasjon vil den elektriske fordelingen være avhengig av geometrien og er omvendt proporsjonal med radiusen, gitt ved:

$$E_0(r) = \frac{U}{r \cdot \ln \frac{r_{ytre}}{r_{indre}}} \quad (4)$$

Hvor  $r$  er plassering i isolasjonen, og er  $r_{indre}$  og  $r_{ytre}$  er henholdsvis indre og ytre radius. Forventet elektrisk feltfordeling ved påtrykt DC-spenning er illustrert under.



Figur 0-7 - Skjematisk representasjon av elektrisk feltfordeling ved kabelkonfigurasjon. Maksimal feltstyrke er ved lederen.

Estimert gjennomsnittlig elektrisk feltfordeling for kabelen beregnes ved [8]:

$$E_{gjennomsnitt} = \frac{U}{r_{ytre} - r_{indre}} \quad (5)$$

Dersom romladning akkumuleres i isolasjonen, vil det elektriske feltet ved påtrykket spenning være gitt av summen av to bidrag: romladningsfelt  $E_\rho$  og eksternt felt  $E_0$  (også kalt Laplacefelt), induert av påtrykket spenning:

$$E = E_0 + E_\rho \quad (6)$$

Ved omskrivning av Gauss' lov (8), kan lokal elektrisk feltforsterkning grunnet romladning uttrykkes ved Poissons ligning (9):

$$\nabla \cdot D = \rho \quad (7)$$

$$\rho = \nabla \cdot (\varepsilon_0 \varepsilon_r E_\rho) \quad (8)$$

$$\nabla E_\rho = \frac{\rho}{\varepsilon_0 \varepsilon_r} \quad (9)$$

Ved å kombinere Gauss lov (8), kontinuitetsligningen (10) og Ohms lov (11) i et homogent elektrisk felt:

$$\nabla \cdot j = -\frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (10)$$

$$j = \sigma E_\rho \quad (11)$$

kan teoretisk total romladning,  $\rho$ , kalkuleres ved:

$$\rho = -\frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r}{\sigma} \frac{\partial \rho}{\partial t} + J \cdot \nabla \left( \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r}{\sigma} \right) \quad (12)$$

Hvor  $j$  er strømtetthet,  $\varepsilon_0$  er permittiviteten i vakuum,  $\varepsilon_r$  er relativ permittivitet i isolasjonsmaterialet og  $\sigma$  er elektrisk ledningsevne [15].

Feltøkningen forårsaket av romladning kan kalkuleres som prosentandel av maksimal feltøkning. For flat testobjekt gjelder:

$$\%_E = \frac{E_{max} - \frac{U_0}{d}}{\frac{U_0}{d}} 100 \quad (13)$$

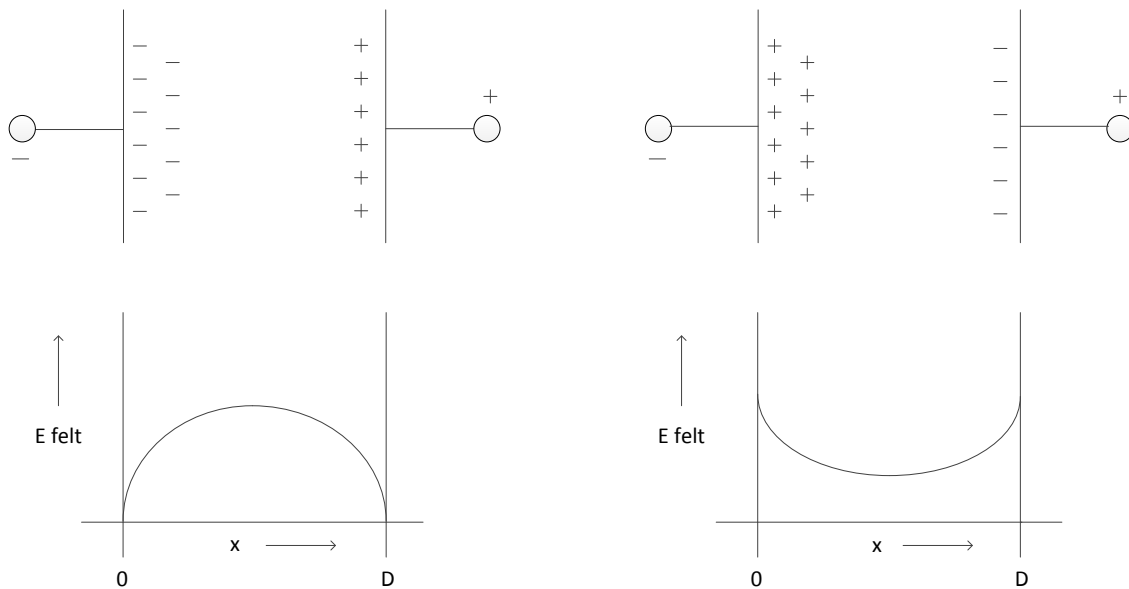
Hvor  $E_{max}$  er maksimalt elektrisk felt i testobjektet. For en kabelkonfigurasjon kan prosentandelen av maksimal feltøkning angis som funksjon av radiusen [15]:

$$\%_E(r) = \frac{E(r) - \frac{U_0}{d}}{\frac{U_0}{d}} 100 \quad (14)$$

Opphopningen av romladning vil være avhengig av forholdet mellom injeksjon eller ekstraksjon og transporten av ladningsbærere i materialet. Dersom transportraten er mindre,



vil romladning primært akkumuleres nær elektroden. Polariteten til romladningene vil da være lik polariteten på tilstøtende elektroden, og betegnes *homoladning*. Dersom raten av injeksjon eller ekstraksjon er mindre enn transporten av ladningsbærere, vil romladninger av motsatt polaritet akkumuleres. Dette betegnes *heteroladninger* [6].



**Figur 0-8 – Illustrasjoner tilsvarende flate testobjekt, med henholdsvis homoladninger og heteroladninger, samt skjematisk representasjon av felddistribusjon ved romladningsregioner fra elektrodene ved  $x=0$  og  $x=D$ . Fellet med homoladning reduseres og omsider vil injeksjonen undertrykkes. Ved heteroladning vil elektrodefeltet økes ettersom potensialdifferansen legges til totalt elektrisk felt,  $E$ , Formel (6) [6, 7].**

Homoladninger kan bli generert ved fanging av injiserte ladninger nær injiserende elektrode, og resulterende romladningsdistribusjon vil redusere det elektriske feltet ved elektroden og øke feltet i bulk [11].

Heteroladninger kan genereres ved feltassistert ionisering av urenheter i bulk. Ved påtrykket elektrisk felt kan ladete molekyler eller ioner migrere mot elektroden av motsatt polaritet hvor de kan akkumuleres. Heteroladninger kan også oppstå hvis en av elektrodene delvis blokkerer ekstraksjonen av mobile ladninger injisert av den andre. Heteroladninger resulterer i elektrisk feltøkning ved et eller begge elektrodefelt og reduserer elektrisk felt i bulk [11].

### 1.6.6 Polariseringsmekanismer

Det er flere mekanismer som kan gi polarisasjon i dielektrika. *Elektronisk polarisasjon*, oppstår ved påtrykket elektrisk felt, og er en forskyvning av elektroner relativt i forhold til atomkjernen. Elektronene vil dermed bli konsentrert på en side av atomkjernen, proporsjonalt med påtrykket felt. *Ionisk polarisasjon*, oppstår ved påtrykket elektrisk felt, og er krefter som trekker på ionene i materialet. Positive ioner trekkes mot en side, og negative ioner motsatt, dette resulterer i temporære dipoler. *Kontaktflate polarisasjon*, som tidligere nevnt vil dielektrika inneholde uregelmessigheter og urenheter. I tillegg til dette vil det være noen frie

elektroner, som ved påtrykket felt, vil beveges til overflatene. Dette resulterer i at overflaten nærmest positiv polaritet kan oppnå en negativ ladning og overflaten nærmest negativ polaritet, en positiv ladning. *Dipolpolarisering* oppstår ved at permanente dipoler vil orienters ved påtrykket elektrisk felt. I teorien vil denne orienteringspolariseringen være tilnærmet proporsjonal med feltet.

I PE er det antatt at overvekten av polarisering vil være forårsaket av elektronisk polarisasjon [8].

### 1.6.7 Effekt av romladninger

Et isolasjonsmateriale under drift er kontinuerlig utsatt for elektriske påkjenninger, slik at de fysiske egenskapene gradvis forandres over tid. Denne irreversible prosessen er omtalt som *elektrisk aldring*, og er en gradvis degraderingsprosess som til slutt kan lede til gjennomslag i materialet. Aldringen vil være avhengig av den påtrykte elektriske feltstyrken og tid i drift [5].

Akkurat hva som forårsaker dielektrisk gjennomslag har blitt studert i flere år, men er fortsatt ikke fullt ut forstått [16]. Flere mekanismer kan være involvert og disse vil være avhengig av form, frekvens og elektrisk feltfordeling, i tillegg til innvirkning fra andre faktorer som materialtype, geometri og ytre påkjenning (mekanisk, miljømessig eller termisk). Til nå er forskningsmiljøet uenige om hvorvidt romladning forårsaker elektrisk aldring, er et symptom på det eller begge deler [15, 17], noen forskere er usikre på om det er korrekt å ta med romladning i vurderingen av gjennomslagsfenomener, fordi det skjer på mikroskopisk nivå [10].

Akkumulering av romladning er ofte observert nært til injiserende elektrode etter relativt kort tid, avhengig av påtrykket elektrisk felt. Dersom det skulle oppstå kortslutning av elektrodene vil det resultere i en utladende strøm, og de fangede ladningsbærerne (hovedsakelig elektroner) vil bli termisk emittert til ledningsbåndet, og deretter utladet ved en av elektrodene. Avhengig av andel akkumulert romladning, er det mulig etter lang elektrisk påkjenning, at feltet blir høyt nok til å forårsake partielle utladninger, som tilslutt kan lede til destruktivt gjennomslag [5]. Forsøk har vist at det er sammenheng mellom romladningsakkumulasjon og gjennomslagsstyrke, grunnet lokal feltøkning høyt nok til å trigge gjennomslag [14, 18, 19] eller som følge av elektrodematerialets innflytelse på akkumulert romladning [11, 20, 21].

Som nevnt i kapittel 2.3.4, vil fanging av ladningsbærere kunne forårsake utvikling av energikvantum tilsvarende differansen mellom energinivået fra ledningsbåndet til felledybden. Ingen aldrings- eller gjennomslagsteori er utviklet for å forklare innvirkninger fra denne energien i sammenheng med gjennomslagsprosesser. Det kan likevel antas at det kan forårsake direkte, lokal ødeleggelse i en mikroregion rundt fellen. Eventuelt er det antatt at denne energien kan omsettes ved å bli overført til et nytt elektron. I så tilfelle vil dette kunne gi opphav til en varmeladningsbærer, med tilstrekkelig energi til å bombardere molekyler og bryte båndstrukturer. Dette kan forårsake defekter eller produsere frie radikaler, som igjen vil

gi opphav til nye feller. Sannsynligheten for denne reaksjonen vil øke med injiserte elektroner, som igjen vil øke med påtrykket felt. Illustrativt vil denne reaksjonen være analog med dissiperingen av energi når vann drypper ned på en stein, og gradvis graver ut overflaten [5]. Det er antatt at regioner med romladning kan være av betydning i sammenheng med elektrisk treinitiering. Injiserte homoladninger vil kunne skjerme regioner rundt defekter med høy elektrisk påkjenning, slik at eventuell elektrisk treinitiering vil skje ved høyere påtrykt spenning og etter lengre initieringstid enn ved AC. Likevel vil effekten av høyere drivfelt ved bruk av DC-spenning, kunne gi rask utvikling av et elektrisk tre eller en gjennomslagskanal mot motsatt elektrode, når første gjennomslagskanal er utviklet [22]. Elektrisk treinitiering er også antatt å kunne være påvirket av kombinasjonen av relativ høy mobilitet på ladningsbærere grunnet romladning, og mulighetene for strukturell defekter grunnet varmeladningsbærere [23].

I de fleste HVDC-overføringsystemer er toveis kraftflyt en vanlig og nødvendig operasjonsprosedyre (eksempelvis i forbindelse med kraftutveksling). I forbindelse med polaritetsreversering kan tilstedeværelsen av romladning være særlig risikabelt. I dette tilfellet vil isolasjonen bli utsatt for summen av romladningsfeltet og feltet induert av den inverterte DC-spenningen. Dette fører generelt til et maksimum felt ved indre leder i kablet, som i verste fall kan dette gi et maksimumfelt så høyt som dobbel verdi av Laplacefeltet [7, 15]. Dette er velkjent som en ledende årsak til gjennomslag i tidligere kommersielle kabler [24, 25].

## 1.7 PEA målemetode

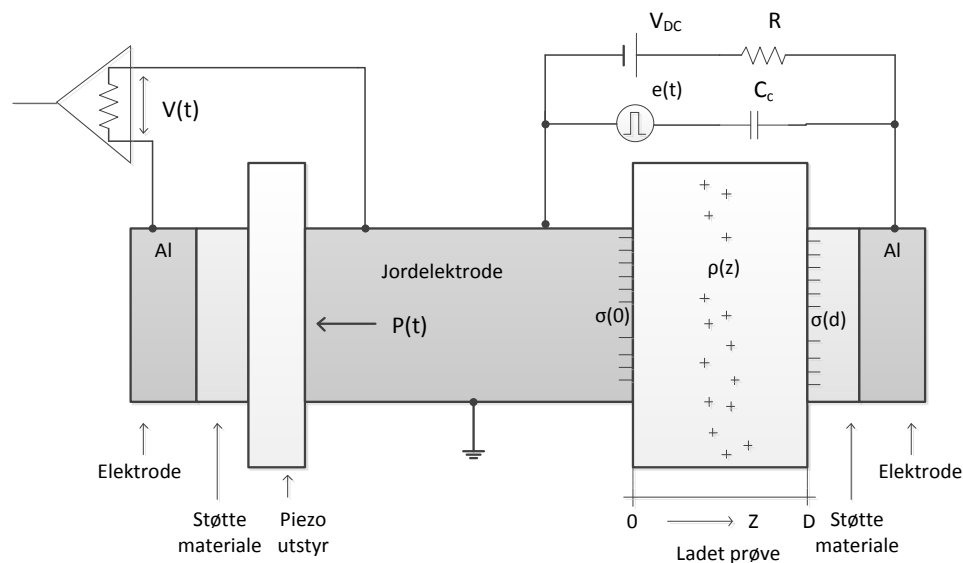
I denne oppgave benyttes *TechImp Pulsed Electro Acoustic*, PEA, måleutstyr. Fordelen med dette systemet er at det er et relativt enkelt eksperimentelt oppsett med forholdsvis enkel tolkning av resultatene. Generelt eksperimentelt oppsett er skematisk representert i Figur 0-9. Operasjonsprinsippet er basert på Coulombs kraftlov [13], og er tilsvarende for flate testobjekt og miniatyrkabel.

Ved PEA metoden vil et pulserende elektrisk felt,  $e(t)$ , påtrykkes et testobjekt med tykkelse  $d$ , og det indueres en forstyrelse på hver ladning. Denne bevegelsen genererer en akustisk trykkbølge  $p(t)$  som forplanter seg fra romladningen, i  $x$  retning i materialet. Under forutsetning av at det er samsvar mellom akustiske impedanser, vil den akustiske trykkbølgen,  $p(t)$ , være proporsjonal med ladningsdistribusjonen,  $q(t)$ .

En piezoelektrisk transduser koblet til den nedre elektrode konverterer de akustiske bølgene til elektriske ladningssignal  $q(t)$ , som etter forsterkning kan observeres på oscilloskopet. Avstanden som tilbakelegges av trykkbølgene kan beregnes ved:

$$s = v_{lyd} \cdot t \quad (15)$$

Hvor  $s$  er strekningen,  $v_{lyd}$  er lydens hastighet i gitt materiale og  $t$  er tiden. Lydens hastighet i aktuelle materialer er gitt i Tabell 0-1. Amplituden til signalet er gitt av ladningstettheten [5, 26, 27].



Figur 0-9 - skjematiske representasjon av testoppsett for romladningsmålinger ved bruk av PEA metoden.

### 1.7.1 Kalibrering

Det er kun romladningsakkumulering forårsaket av påtrykt DC-spenning som er av interesse ved gjennomførte måleserier. For å skalere verdiene i målingene i forhold til potensielt eksisterende romladninger, kalibreres flate testobjekt og miniatyrkabel før måleseriene settes i gang. Skaleringen gjøres ved at mulige sammenhenger fra kalibreringsmålingene i forhold til måleseriene trekkes fra. Utvidet analyse av hvordan dette gjennomføres er presentert av Bodega [15].

### 1.7.2 Akustisk bølger, refleksjon og transmisjon

Akustiske bølger forplantes igjennom testobjektet og når de detekteres av sensoren, vil det akustiske signalet bestå av tre komponenter; induerte ladningene på nedre elektrode  $\sigma(x=0)$ , induerte ladninger på øvre elektrode  $\sigma(x=d)$ , og ladningene inne i testobjektet  $\rho(0 < x < d)$ . Ved signalbehandling konverteres signalet til elektrisk signal i frekvensdomenet, deretter blir det akustiske bølgesignalet omformet ved invers Fourier transform til romladningsdistribusjon i tidsdomenet.

For koaksial kabelgeometri vil påtrykket pulsspenning og akustiske bølger gjennom isolasjonen påvirke utgangssignalet fra transduseren. I tillegg vil akustisk attenuasjon og dispersjon ved forplantningen av det akustiske signalet gjennom isolasjonen bli signifikant ved tykkere kabelisolasjon. Ved prosesseringen av rådata fra PEA-målesystemet må alle disse faktorene redegjøres, for å gi en reell fremstilling av romladningsdistribusjonen igjennom kabelisolasjonen [28]. Eksempelvis vil refleksjon kunne oppstå i grensesjiktene mellom materialer med forskjellig akustisk impedans. Dersom disse reflekteres til detekterende

elektrode, vil dette kunne gi et feilaktig signal, som kan gi inntrykk av romladningsdistribusjon som ikke er reell.

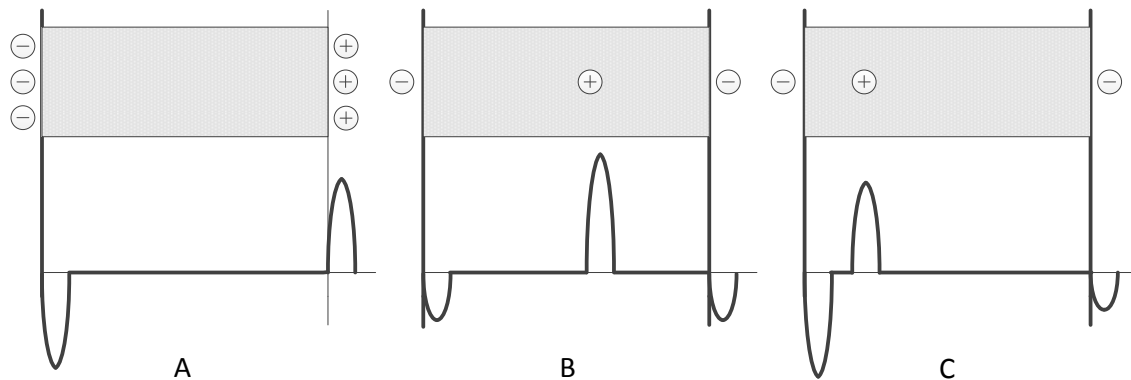
Tabell 0-1 gir en oversikt over forskjellige fysiske egenskaper i materialer benyttet i PEA måleoppsettet. Utvidet analyse av akustisk bølgepropagering i forbindelse med PEA-måleoppsett for miniatyrkabel er presentert av Fu et al. [28].

Tabell 0-1 - Fysiske egenskaper for materialer brukt i PEA målinger

Materiale	Tetthet $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Akustisk hastighet $u$ [m/s]	Akustisk impedans $Z(=\rho u)$ [kg/m <sup>2</sup> sek]	Relativ dielektrisk konstant $\epsilon_r$
PEX	900	2000	$1,8 \times 10^6$	2,3
Halvleder	1100	2300	$2,5 \times 10^6$	-
Aluminium	2690	6420	$17,3 \times 10^6$	-

### 1.7.3 Analyse av resultater

For å kunne analysere resultatene korrekt fra målingene er det viktig å kjenne utgangspunktet for resultatene som oppnås. Når en romladning oppstår vil det alltid induseres en ny ladning av motsatt polaritet, slik at totalt antall ladninger i systemet er i likevekt. Dette vil si at summen av ladninger i systemet alltid vil være null.

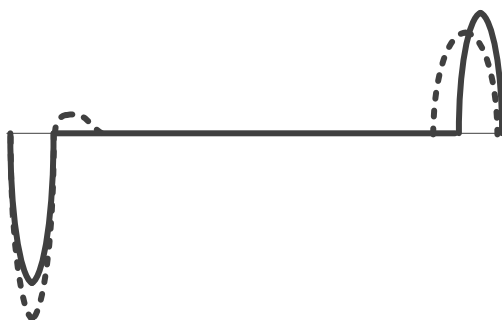


Figur 0-10 – Romladningsdistribusjon i PEA systemet uten akustisk attenuasjon og dispersjon. Figur A er med påtrykket spenning, Figur B og C er med spenningsløse. De grå områdene indikerer testobjektet, grafen under viser responsen som avleses på oscilloskopet. Katoden vil være lokalisert til venstre, og anoden til høyre på oscilloskopresponsen.

Figurene over viser forskjellige forhold med ladningsdistribusjon. Ladningene i umiddelbar nærhet av elektrodene vil alltid være i grensesjiktet mellom elektrode og isolasjon. I tilfelle A er spenning påtrykket, ingen ladningsinjeksjon har oppstått slik at romladning ikke vil være tilstedeværende. I dette tilfellet er det kun ladninger på elektrodene som registreres på oscilloskopet. I tilfelle B er spenningen avslått, og en positiv ladning er tilstedeværende i

midten av materialet. Denne romladningen vil indusere ladninger av motsatt polaritet ved elektrodene. I tilfelle C er systemet også spenningsløst. I dette tilfellet er romladningene asymmetrisk plassert i bulk, og induuerte ladninger på elektrodene vil være av forskjellige relative verdier avhengig av plasseringen til romladningen.

Typisk utvikling av romladningsdistribusjon over tid er vist i Figur 0-11. Homoladninger er utviklet i grensesjiktet ved begge elektroder. I nærheten av katoden utvikles en heteroladning, som følgelig induerer nye homoladninger (også kalt speilladninger) [15]. Akkumulasjonen av homoladningen i grensesjiktet mellom anoden og isolasjonen, forårsaker en utvidelse og forskyvningen av toppen mot prøven. Høyden på toppen reduseres grunnet heteroladningene av samme polaritet som er tilstedeværende ved katoden [10].



Figur 0-11 – Romladningsdistribusjon i PEA systemet uten akustisk attenuasjon og dispersjon. Den heltrukne linjen indikerer kort tid etter målestart, uten romladning; den stiplede linjen indikerer lengre tid.

#### 1.7.4 Posisjon av elektroder

I resultatene presentert i denne oppgaven er elektrodene plassert mot responstoppe til romladningsakkumulasjonen. Dette er unøyaktig, elektrodene vil egentlig være plassert som vist i Figur 0-10, men plasseres slik da det er vanskelig å definere eksakt hvor elektrodene vil ligge i responsfigurene [11].

## 2. Metodikk

Eksperimentelle undersøkelser er gjort på kryssbunden HVDC polyetylen (PEX). Måleseriene er gjennomført på flate testobjekt og miniatyrkabel. De flate testobjektene består av Polyetylen LE4253 med påført gullelektroder. Miniatyrkabelen består av standard HVAC PEX materialet (LS4201S), som isolasjonsmateriale, og med halvledermateriale (LE0595), som indre og ytre halvleder.

### 2.1 Fremstilling av flate testobjekt

Fremstillingen av flate testobjekt gjennomføres i flere prosesser, hvor renslighet og nøyaktighet er viktig i hver av delprosessene. Alle komponenter som kommer i kontakt med materialet vaskes derfor med isopropanol under flowbenk. Urenheter og forurensning kan forårsake reduserte dielektriske egenskaper, og dermed unøyaktighet i forbindelse med målingene.

#### 2.1.1 Ekstrudering av Polyetylen

Materialet oppbevares i form av pellets, og ekstruderes til tynn film før den formes. Bakgrunnen for dette er for å unngå hulrom og forurensninger, prosessen ble gjennomført som en del av prosjektoppgaven[29], og er nærmere beskrevet der.

#### 2.1.2 Kryssbinding av Polyetylen

Ferdigekstrudert materiale klippes i små biter og måles opp til 5 gram per testobjekt. Før materialet plasseres i form, rengjøres delene av støpeformen grundig med isopropanol under flowbenk. Deretter fordeles materialet jevnt i formene før de settes inn i forhåndsoppvarmet presse. Mellom pressen og støpeformene legges en tykk plastfilm, rengjort med isopropanol, som beskyttelse mot urenheter under selve støpeprosessen. Kryssbinding av polyetylen utføres ved høyt trykk og temperatur før det avkjøles, innstillingene fra pressen er gitt i Tabell 2-1.

Tabell 2-1 - Prosessinnstillinger ved kryssbinding

Prosess	Trykk [tonn]	Temperatur[°C]	Tid[minutter]
Lavtrykk	3,5	118	10
Høytrykk	25	170	40
Vannkjøling	25	Av	10

Det kryssbundne materialet stanses og ferdig testobjekt er sirkelformet med tykkelse 0,5 mm og diameter 75 mm.

### 2.1.3 Kondisjonering

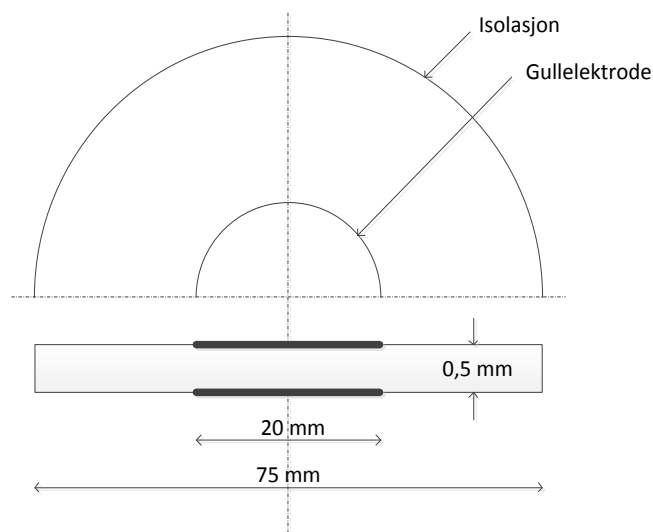
Kondisjonering gjennomføres for å unngå biprodukter, som antioksidanter og restgasser, som ikke er ønskelige i testobjektene. Dette gjøres ved å oppbevare objektene i varmeskap på 90 °C ved atmosfærisk trykk i tre dager.

### 2.1.4 Ionesputting av gull

Gullelektroder påføres testobjektene ved bruk av en ionsputter. Et ferdig testobjekt legges i en plastform og skrues godt til for å oppnå jevne, sentrerte elektroder. Deretter plasseres plastformen i ionsputteren og prosessen settes i gang.

Ionesputting er en prosess hvor målmaterialiet blir bombardert med raske tunge partikler, og det oppstår erosjon. Dermed slynges løse atomer ut og festes på testobjektet. Materialet som benyttes er gull, da gull har god ledningsevne. Formålet med gullelektrodene er for å gi en optimal kontaktflate mellom elektrodene i PEA-oppsettet og testobjektet.

Ionesputting utføres i 5 minutter på hver side av testobjektet, og det benyttes en strømstyrke på 5 mA ved en spenning på 1200 V DC. Skisse av det ferdige produktet ses i Figur 2-1.



Figur 2-1 - Testobjektets geometri

### 2.1.5 Måling av tykkelse

Ved støpeprosessen av flate testobjekt, vil faktisk tykkelse variere noe i forhold til støpeformen. For å kartlegge reell tykkelse ble testobjektene snittet opp, og målt med mikroskop.



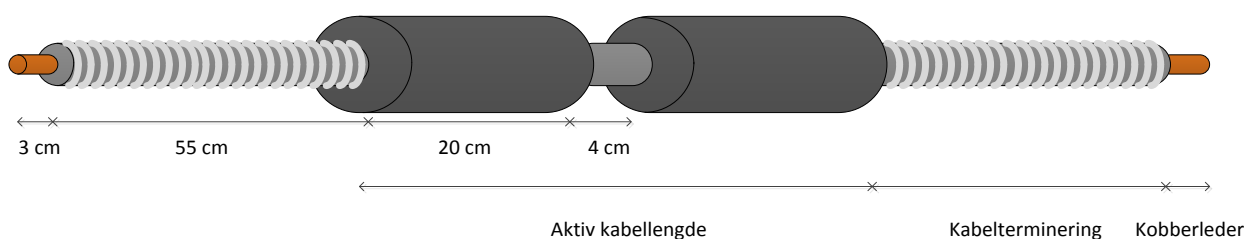
## 2.2 Modifisering av miniatyrkabel

Ekperimentelle undersøkelser gjennomføres på en miniatyrkabel bestående av PEX materialet (LS4201S), som isolasjonsmateriale, og med halvledermateriale (LE0595), som indre og ytre halvleder. Testkabelen kommer ferdig ekstrudert, kryssbunden og kondisjonert fra produsent. Supplerende informasjon om kabelen er gitt i Tabell 2-2:

Tabell 2-2 – Oversikt over bestanddelenes i miniatyrkabel

Komponent	Beskrivelse	Tykkelse [mm]
Leder	Solid kobber (1,5 mm <sup>2</sup> )	1,38 (diameter)
Indre halvleder	Ekstrudert halvledermateriale av PEX, LE0595	0,46
Isolasjon	PEX, LS4201S	1,75
Ytre halvleder	Ekstrudert halvledermateriale av PEX, LE0595	0,15
Miniatyrkabel	Ytre mål	6,1 (diameter)

Noen modifikasjoner gjøres før kabelen kan benyttes i testoppsettet. Kabelen kappes av til lengden 160 cm. En skrellemaskin benyttes til å fjerne ytre halvleder på hver side opp til en lengde på 55 cm, deretter tvinnes termineringene med en resistiv feltstyring tape. Elektrisk feltstyring benyttes for å få en jevn feltfordeling, unngå feltopphopning og overslag i termineringene. Midt på testobjektet pusses kappen ned til isolasjonen med finkornet sandpapir, slik at et område på cirka 4 cm eksponeres. Avslutningsvis avmantles endene av kabelen helt ned til kobberlederen ved bruk av en avbitertang. Dimensjonene på kabelen er nærmere beskrevet i Figur 2-2.



Figur 2-2 - Ferdig miniatyrkabel med dimensjoner

## 2.3 Oppsett for målinger

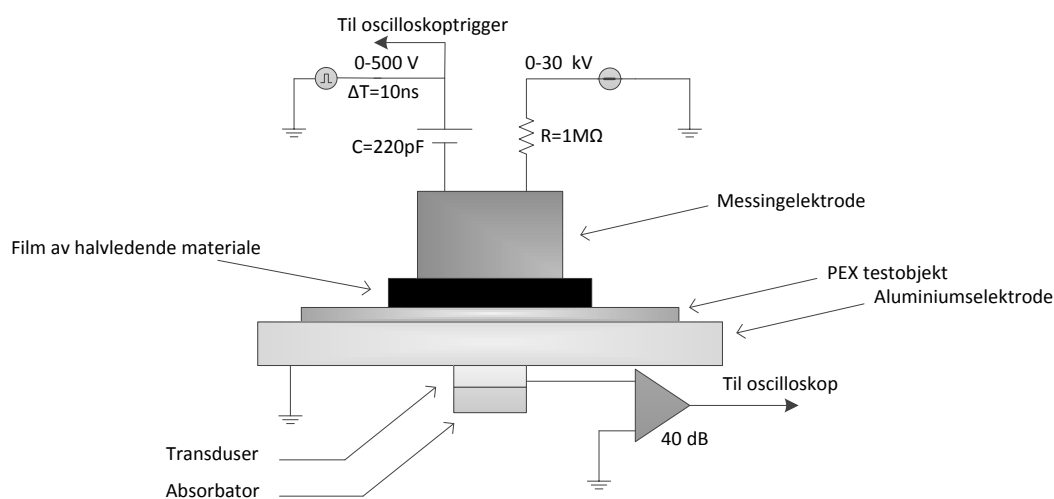
Målemetoden benyttet for målinger gjort på flate testobjekt og miniatyrkabel er PEA målemetode, beskrevet i Kapittel 1.7. Sensitivitetsgrensen til utstyret er  $0,1 \text{ C/m}^3$ , målingene gjøres automatisk og loggføres av en datamaskin. Signalanalyseprogramvaren er basert på Labview, og rådataen prosesseres videre i Matlab [27].

### 2.3.1 Måling på flate testobjekt

Ekspérimentelt oppsett benyttet for å måle romladning i flate testobjekt er beskrevet i Figur 2-3. Målecellen inneholder piezoelektrisk måleenhet samt pulsgenerator, som genererer en puls på 0-500 V med en pulslengde på 10 ns. Nedre elektrode er av aluminium (katode), øvre elektrode, en halvleder (anode) påfulgt av en messingelektrode. Innsiden av målecellen vaskes med isopropanol. På aluminiumselektroden og på halvlederabsorbatoren plasseres en dråpe silikonolje, for å forbedre den akustiske kontakten. Deretter skrues anoden på målecellen ved bruk av en momentnøkkel innstilt på 25 Nm. Målecellen plasseres i et Faradaybur, og kobles til oscilloskop, datamaskin, samt i serie til DC-spenningskilde. DC kilden leverer 0 – 70 kV. Øvre spenningsnivå for testcellen er 30 kV.

Testobjektet kalibreres før måleseriene settes i gang, som beskrevet i Kapittel 1.7.1.

Måleseriene utføres automatisk av programvaren i Labview som styrer måleutstyret. Tidspunktene for måleseriene stilles inn manuelt i programvare før seriene settes i gang. Måletidspunktene for flate testobjekt er gjengitt i Tabell x i vedlegg x. Hver måleserie består av 10 målinger ved DC-spenning på, og 20 målinger ved DC-spenning av. Pulsspenningen er 500 V ved samtlige måleserier [27].



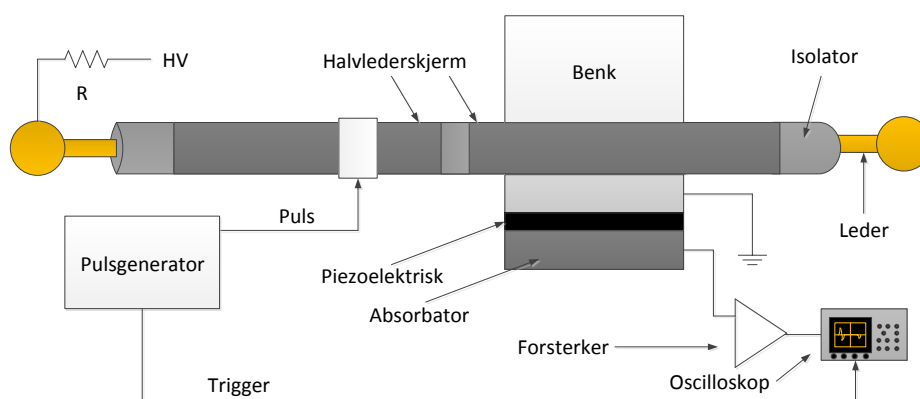
Figur 2-3 - Skjematisk oppsett av TechImp PEA Flat System. Diameteren på aluminiumselektroden er 10 cm.

### 2.3.2 Måling på miniatyrkabel

Ekperimentelt oppsett benyttet for å måle romladning i miniatyrkabel er beskrevet i Figur 2-4. Klemmesystemene til den piezoelektriske måleenheten og til pulsgeneratoren vaskes først med isopropanol, og påføres silikonfett før miniatyrkabelens aktive kabellengde plasseres. Deretter skrues enhetene sammen, slik at god kontakt oppnås mellom utstyr og miniatyrkabel, før kablet kobles i serie med en motstand og DC-kilde. Motstanden har en resistivitet på 50 m $\Omega$ , DC kilden har et variabelt spenningsnivå på 0-150 kV og er påmontert en koronaring mot motstanden, for å forhindre partielle utladninger. Motstående endestykke påmonteres en koronaring, for å begrense feltgradienten, overgangen mellom ledere og kroneringen festes med selvvulkaniserende tape, for å forhindre partielle utladninger. Hele oppsettet er oppkoblet i et Faradaybur, for å begrense støy fra omgivelsene.

Miniatyrkabelen kalibreres før måleseriene settes i gang, som beskrevet i kapittel 1.7.1. Nye 0 kV målinger tas rett før måleserien startes.

Måleseriene utføres automatisk av programvaren som styrer måleutstyret. Tidspunktene for måleseriene stilles inn manuelt i programvare før seriene settes i gang. Måletidspunktene for miniatyrkabel er gjengitt i Tabell A - 1 i Vedlegg A. Hver måleserie består av 10 målinger ved DC-spenning på, og 20 målinger ved DC-spenning av. Pulsspenningen er 5 kV ved samtlige måleserier [27].



Figur 2-4 – PEA-målesystem for miniatyrkabel.



### 3. Resultater

Presenterte resultater består av romladnings- og elektriske feltprofiler. Måleresultatene er oppnådd på grunnlag av *voltage off*-målinger, og figurene er glattet rådata, som gir gjennomsnittlig utviklingskurve.

Maksimal feltforsterkning er funnet i profilene for elektrisk feltfordeling for flate testobjekt, er beregnet med formel (13).

#### 3.1 Flate testobjekt

Syv måleserier for flate testobjekt ble påstartet, hvorpå fire måleserier ble fullstendig gjennomført. De resterende tre måleseriene ble tidlig avsluttet grunnet problemer, nærmere beskrevet i 3.1.1. Alle måleseriene er gjennomført med måleoppsettet beskrevet i kapittel 3.3.1. Kalibrering ble gjort med positiv og negativ DC spenning,  $\pm 2$ , 3 og 5 kV, henholdsvis,  $\pm 4$ , 6 og 10 kV/mm, på samtlige testobjekter. For å eliminere romladning som oppstår ved kalibreringsprosessen, startes måleseriene etter et opphold på 24 timer. Tidsrommet for gjennomførte måleserier er 21 dager, med unntak av måleserie #3.

Ytterligere informasjon om presenterte måleserier og spenning benyttet i måleseriene er gitt i Tabell 3-1.

**Tabell 3-1 – Den estimerte tykkelsen er gitt av størrelsen på form med skims benyttet ved kryssbinding. Gjennomsnittlig feltfordeling er beregnet ved formel (9), i forhold til målt tykkelse.**

Testobjekt	#1	#2	#3	#4
Estimert tykkelse [mm]	0,5	0,5	0,5	0,5
Målt tykkelse [mm]	0,51	0,51	0,51	0,51
Påtrykket DC - spenning [kV]	10	15	20	25
Gjennomsnittlig feltfordeling [kV/mm]	19,61	29,41	39,22	49,02
Tidsintervall [dager]	21	21	21	20

##### 3.1.1 Testobjekter #A, #B og #C

Grunnet problemer ble tre måleserier avsluttet. Testobjekt #A viste romladningsutvikling i midten av materialet fra start,  $t=0$ , av måleserien. En mulig forklaring kan være at dette var som følge inhomogenitet i testobjektet [15]. Ved måleserie #B ble det observert at oscilloskopet var i metning, og derfor ikke ga fullstendige resultater. Måleserien ved testobjekt #C ble raskt avsluttet da testcellen ikke tålte påtrykket spenningsnivå. Ytterligere informasjon om testobjektene er presentert i Tabell 3-2.

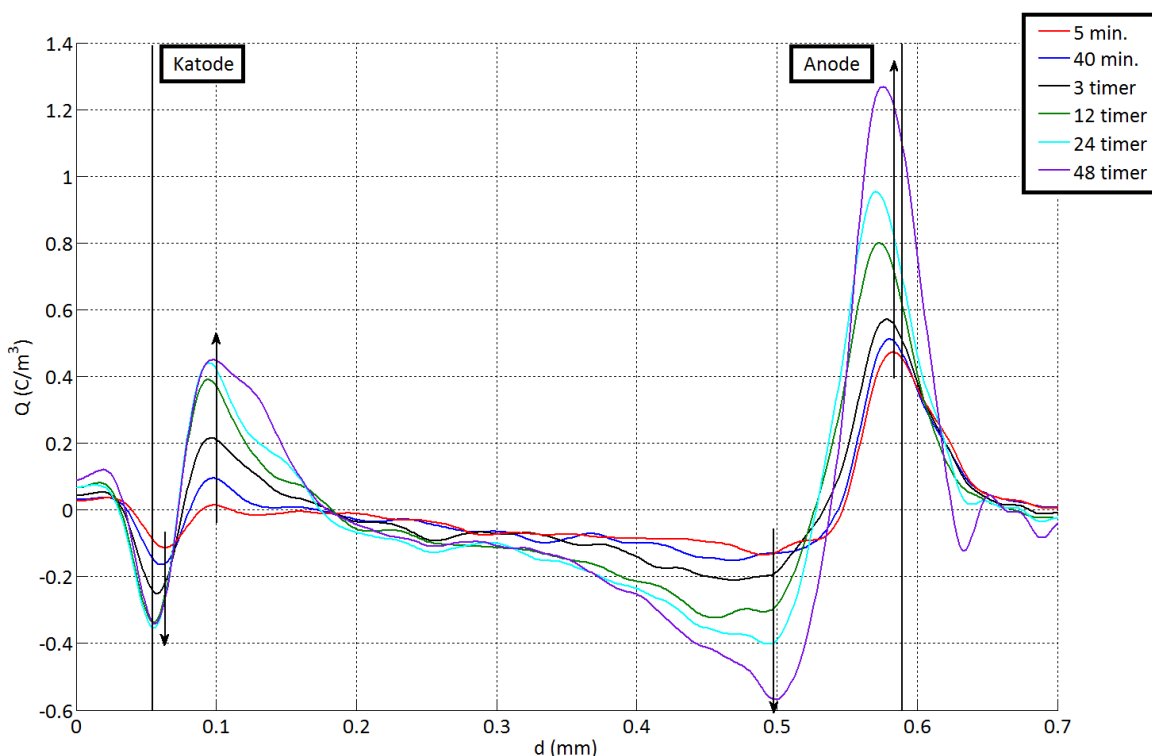
Tabell 3-2 - Terminerte måleserier

Testobjekt	#A	#B	#C
Estimert tykkelse [mm]	0,5	0,5	0,5
Målt tykkelse [mm]	0,51	0,51	x
Påtrykket DC - spenning [kV]	20	20	30
Gjennomsnittlig feltfordeling [kV/mm]	39,22	39,22	~60

### 3.1.2 Testobjekt #1 – 19,6 kV/mm

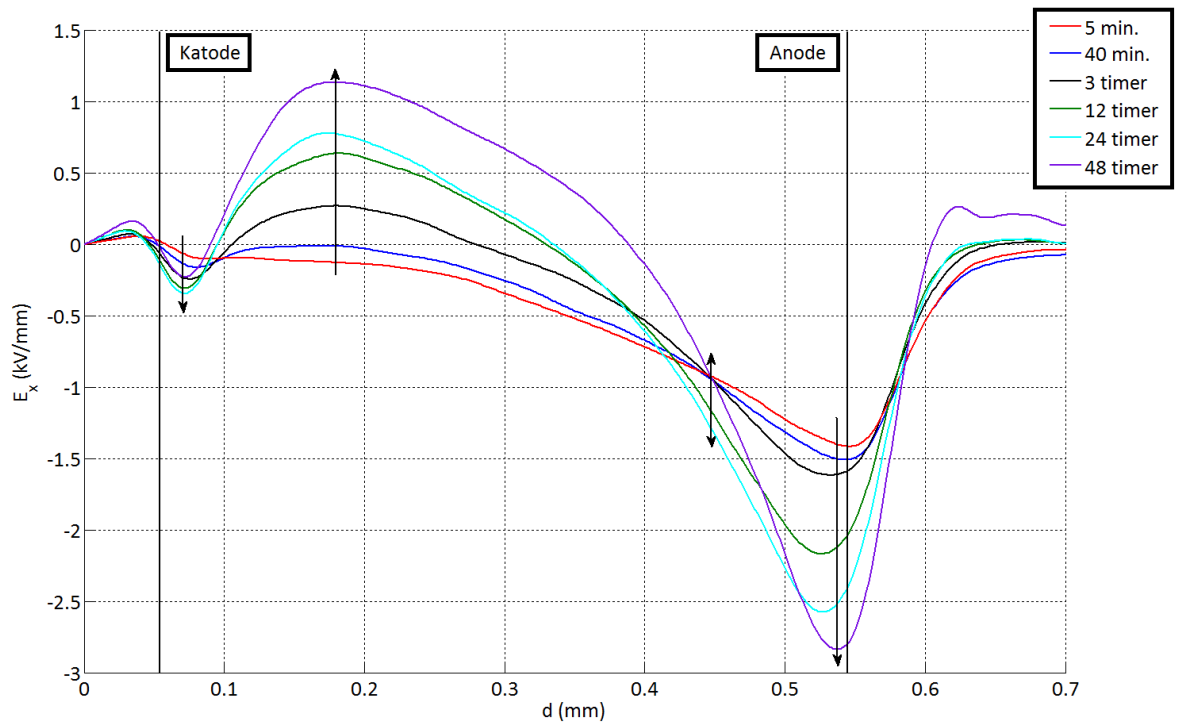
#### Romladningsakkumulasjon og feltutvikling de første 48 timene

Figur 3-1 viser utviklingen av romladninger fra fem minutter til 48 timer. Ved begge elektrodene utvikles romladningsregioner kort tid etter at måleserien settes i gang, i grensesjiktet mellom elektrode og isolasjon akkumuleres homoladninger, og mot bulk utvikles heteroladninger. Utover i bulk er det hovedsakelig akkumulasjonen av negativ romladning forskjøvet mot heteroladningsfeltet ved anoden. Utviklingen ved anoden er raskere og av større verdi enn ved katoden.



Figur 3-1 - Romladningsutvikling testobjekt #1

Korresponderende utvikling for elektrisk feltfordeling er vist i Figur 3-2. Feltforsterkning kan observeres ved katode og anode, men av langt større verdi ved anoden. Utover i bulk er feltforsterkningen markant, og forskjøvet mot anoden. Et skifte observeres mot anoden, hvor feltforsterkningen reverseres fra 24 til 48 timer.

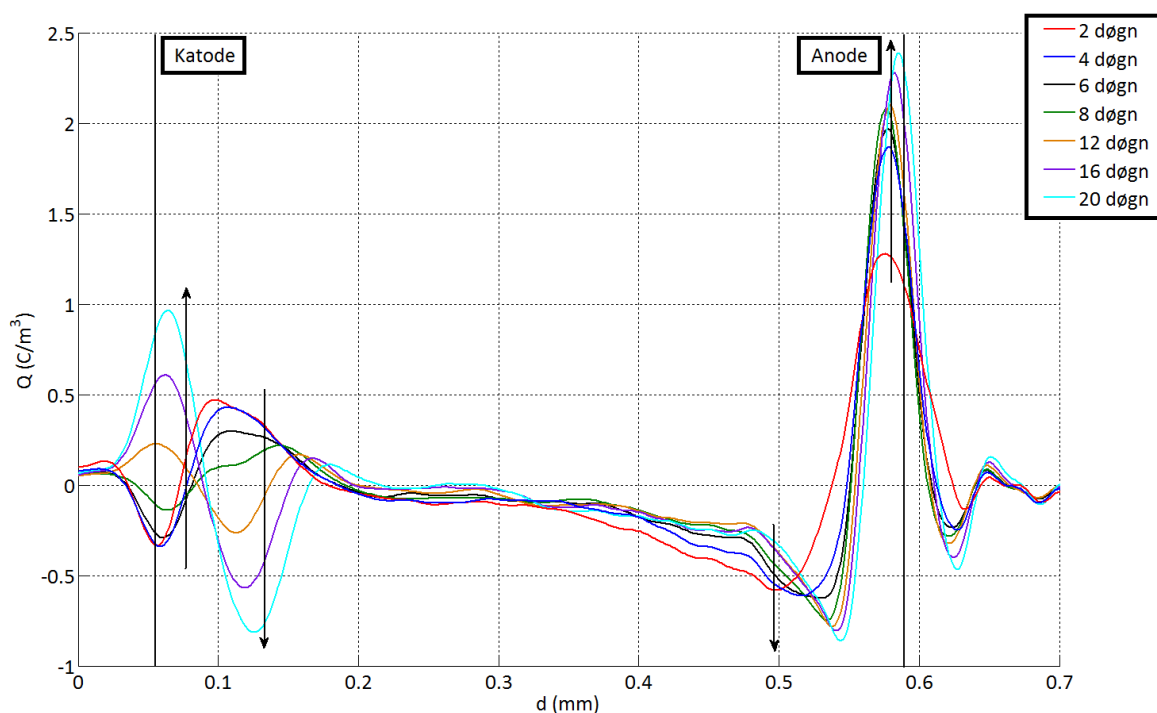


Figur 3-2 - Elektrisk feltutvikling for testobjekt #1

### Romladningsakkumulasjon fra to døgn til 20 dager

Utviklingen av romladninger frem til 20 dager er vist i Figur 3-3. Ved katoden er regionen med homoladninger i grensesjiktet mellom elektrode og isolasjon stabilt frem til fire dager. Deretter minker andel homoladninger frem til åtte dager, før det skjer et skifte frem til 12 dager.

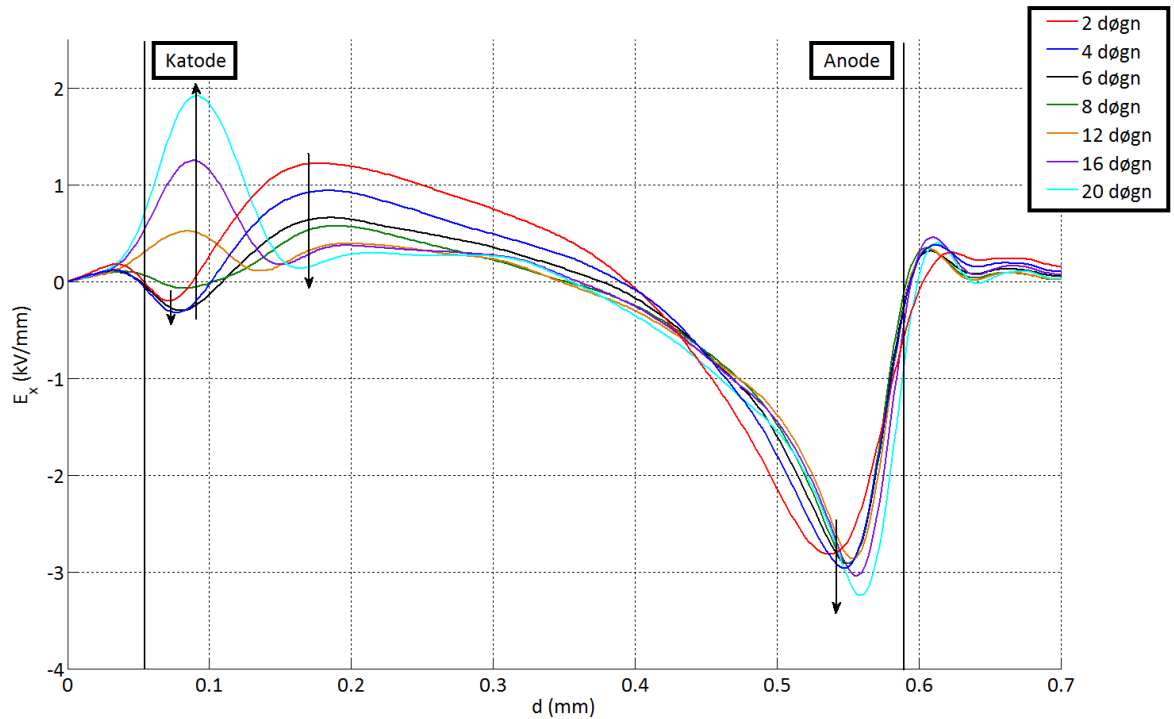
Deretter er det en klar akkumulering av heteroladninger i grensesjiktet. Et tilsvarende skifte skjer i nærheten av katoden. Utover i bulk observeres en reduksjon i ladningsakkumulasjonen, særlig forskjøvet mot anode. I nærheten av anoden øker andelen av heteroladninger, en lik utvikling observeres i grensesjiktet mellom elektrode og isolasjon. Maksimale amplitudeverdier oppnås etter 20 dager.



Figur 3-3 - Romladningsutvikling for testobjekt #1



Korresponderende utvikling for elektrisk feltfordeling er vist i Figur 3-4. Ved katoden er feltforsterkningen av negativ polaritet frem til åtte dager. Deretter reverseres feltfordeling til positiv polaritet fra 12 dager. I nærheten, mot bulk reduseres den positive elektriske feltforsterkningen frem til 20 dager. Feltforsterkningen mot anoden øker lite fra fire til 12 dager. Fra 16 til 20 dager øker feltet ytterligere. Maksimal feltforsterkning observeres ved anoden etter 20 dager, og er beregnet til 16,5 % av påtrykket elektrisk feltstyrke.

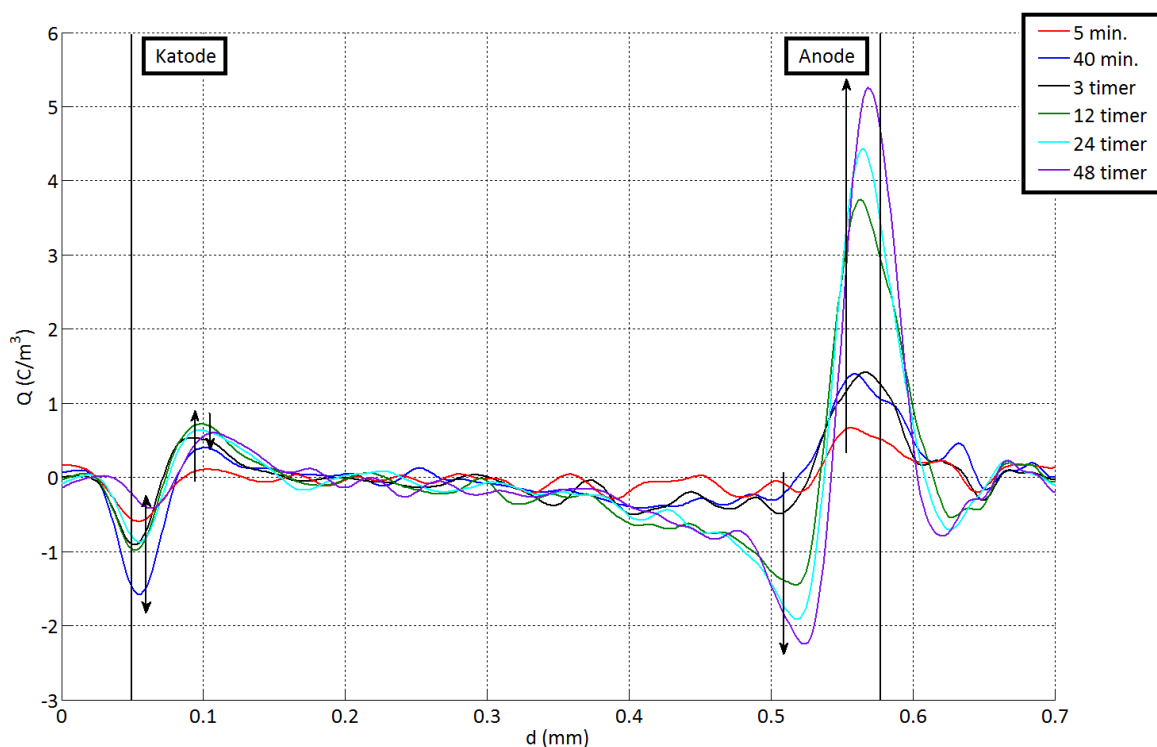


Figur 3-4 - Elektrisk feltutvikling for testobjekt #1

### 3.1.3 Testobjekt #2 – 29,4 kV/mm

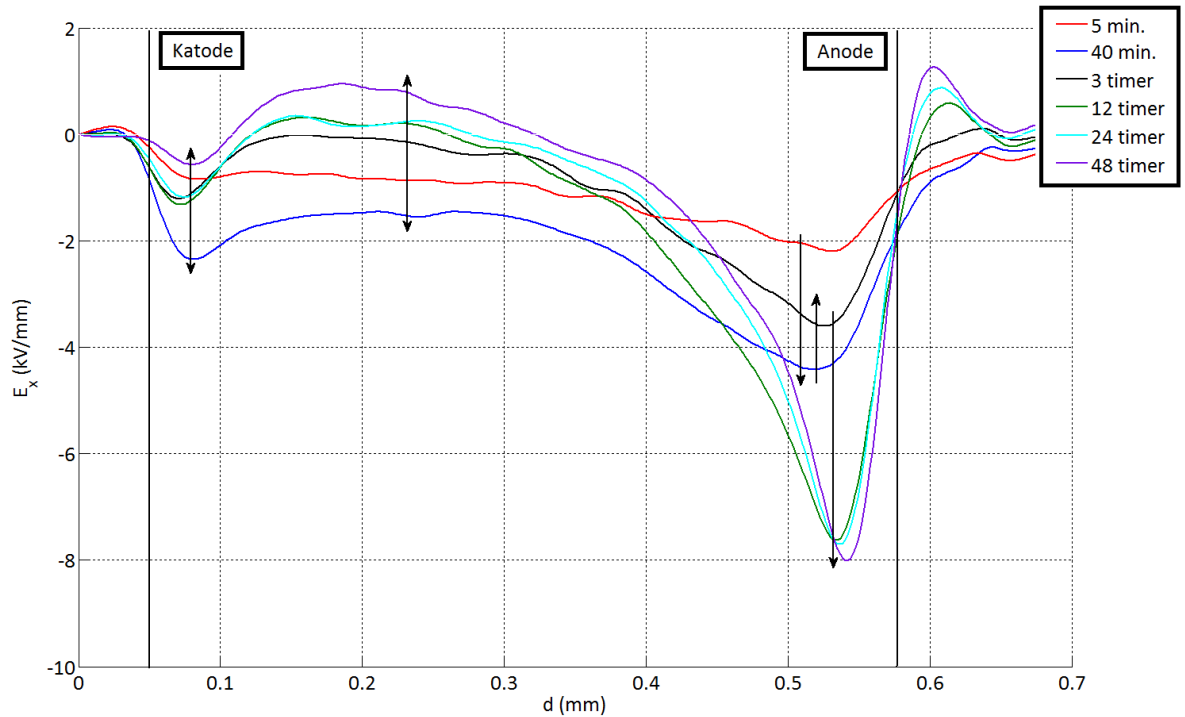
#### Romladningsakkumulasjon og elektrisk feltutvikling de første 48 timene

Figur 3-5 viser utviklingen av romladning fra fem minutter frem til 48 timer. I grensesjiktet mellom katode og isolasjon observeres en økning i homoladninger de første 40 minuttene. Deretter reduseres andelen homoladninger og holder et nivå innen sensitivitetsgrensen frem til 24 timer, før ladningsakkumulasjonen minker ytterligere og forskyves mot bulk ved 48 timer. I nærheten av katoden akkumuleres heteroladninger frem til 12 timer, før en reduksjon og forskyvning skjer frem til 48 timer. I bulk oscillerer responsen slik at romladning ikke kan detekteres. Mot anoden er det antydninger til heteroladninger, før det utvikles markerte regioner fra tre til 48 timer. I grensesjiktet mellom anode og isolasjon akkumuleres homoladninger raskt etter at måleserien er påsatt. Etter tre timer observeres liten utvikling, før det øker frem til 48 timer.



Figur 3-5 - Romladningsutvikling for testobjekt #2

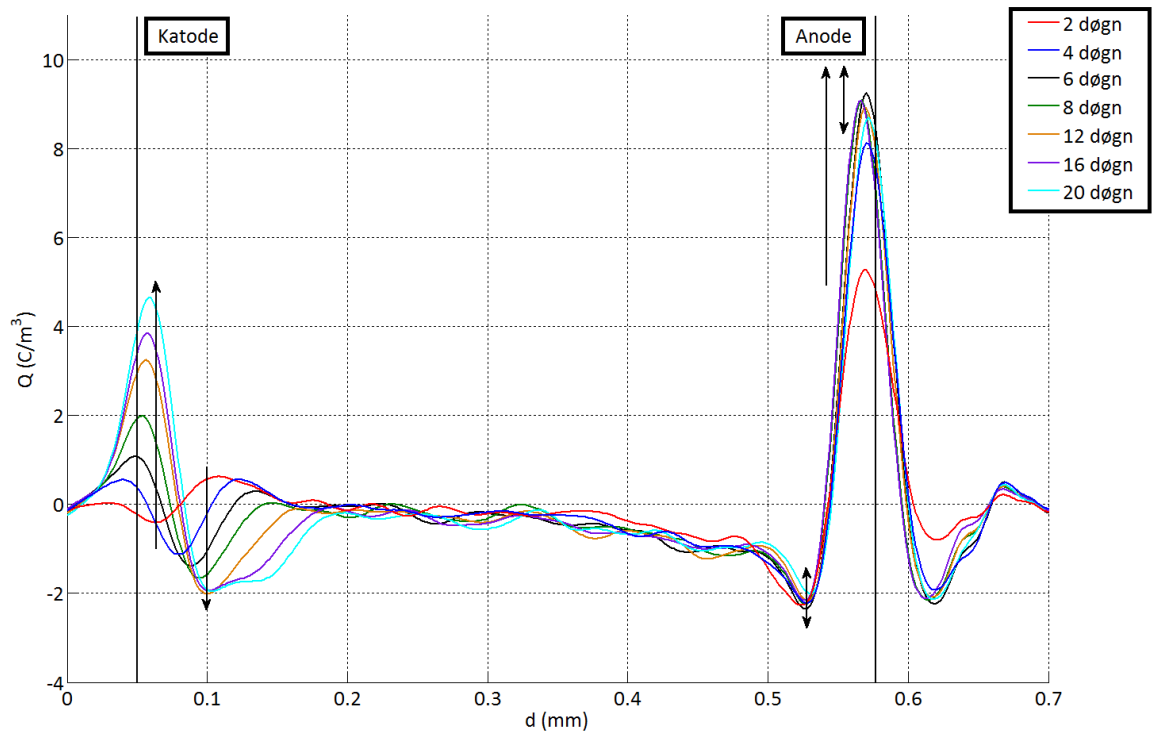
Korresponderende utvikling for elektrisk feltfordeling er vist i Figur 3-6. Ved katoden er feltet av negativ polaritet og øker frem til 40 minutter, før utviklingen reverseres og reduseres. Fra tre timer til 24 timer er feltet nært uendret, før det observeres en ytterligere reduksjon. Tilsvarende utvikling kan observeres i nærheten av anoden, hvorpå polariteten reverseres etter tre timer, og er positiv frem til 48 timer. Ved anoden øker feltet frem til 40 minutter, før en reduksjon observeres etter tre timer. Deretter øker feltet frem til 48 timer.



Figur 3-6 - Elektrisk feltutvikling for testobjekt #2

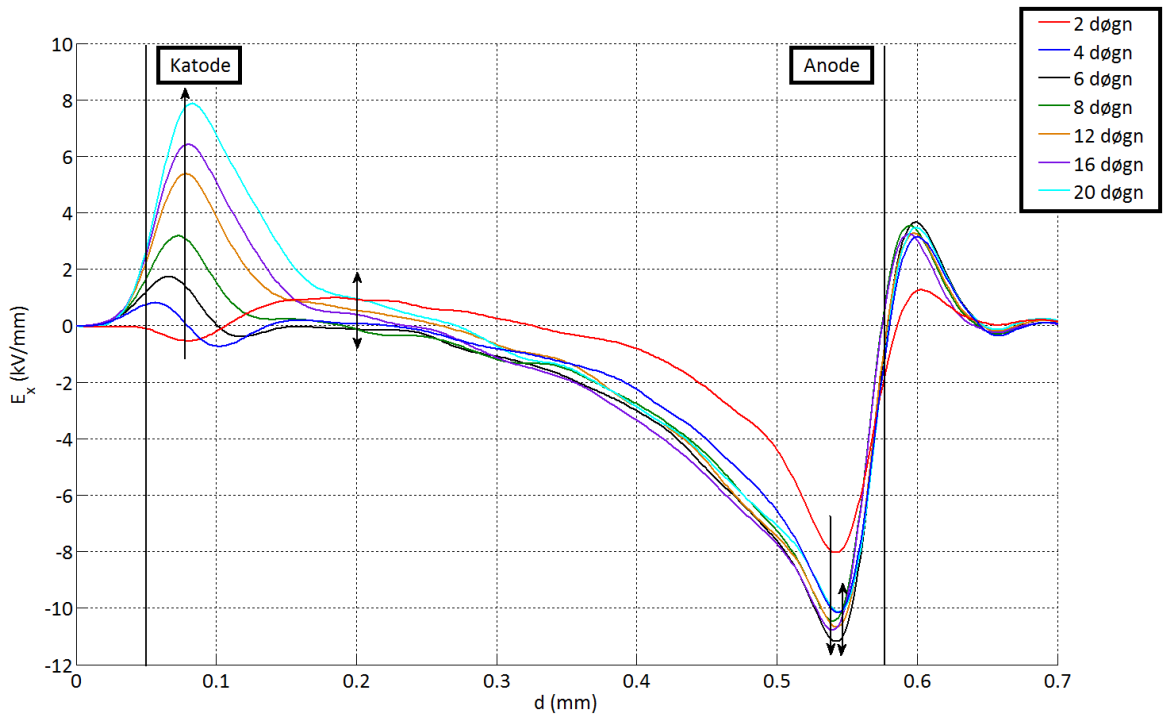
### Romladningsakkumulasjon og elektrisk feltutvikling fra to døgn til 20 dager

Utviklingen av romladningsakkumulasjon frem til 20 døgn er vist i Figur 3-7. I grensesjiktet mellom elektrode og isolasjon ved katoden, skjer et skifte fra homoladninger til akkumulasjon av heteroladninger fra to til fire dager. Deretter øker akkumulasjonen frem til 20 dager. I nærheten minker andelen heteroladninger og overgangen til dominans av homoladninger observeres etter åtte dager. I bulk oscillerer responsen slik at romladning ikke kan detekteres. I grensesjiktet ved anoden øker akkumulasjonen av homoladninger fra to døgn til seks dager. Deretter minker akkumulasjonen frem til 12 dager, økning skjer fra 12 dager til 16 dager, før akkumulasjonen igjen reduseres frem til 20 dager.



Figur 3-7 - Romladningsutvikling for testobjekt #2

Korresponderende utvikling for elektrisk feltutvikling er gitt i Figur 3-8. Feltutviklingen ved katoden går fra negativ til positiv polaritet på feltforsterkningen fra to til fire dager, og øker frem til 20 dager. I bulk forskjøvet mot katoden minker feltforsterkningen fra to til seks dager, før feltutviklingen reverseres og øker ytterligere. Ved anoden er feltfordelingen av negativ polaritet, det elektriske feltet øker markant fra to døgn til seks dager. Etter åtte dager observeres små variasjoner, før feltet er nært verdien etter fire dager. Maksimal feltforsterkning observeres ved anoden etter seks dager, og er 38 % av påtrykket elektrisk feltstyrke.

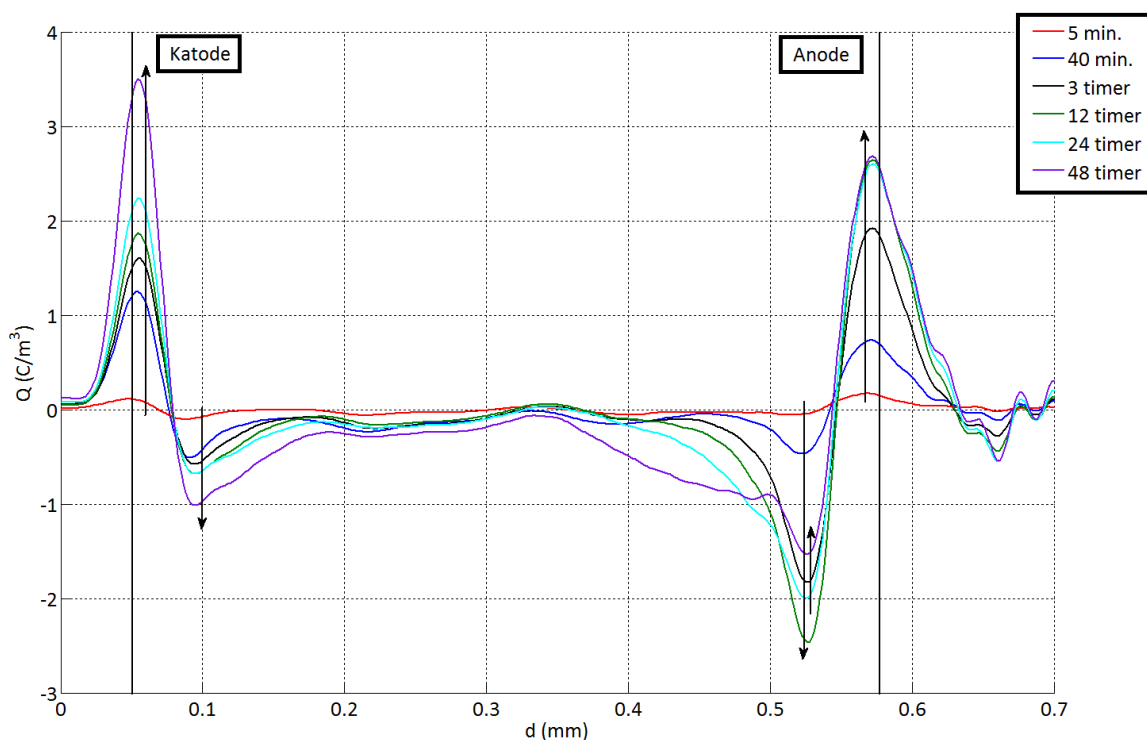


Figur 3-8 - Elektrisk feltutvikling for testobjekt #2

### 3.1.4 Testobjekt #3 – 39,2 kV/mm

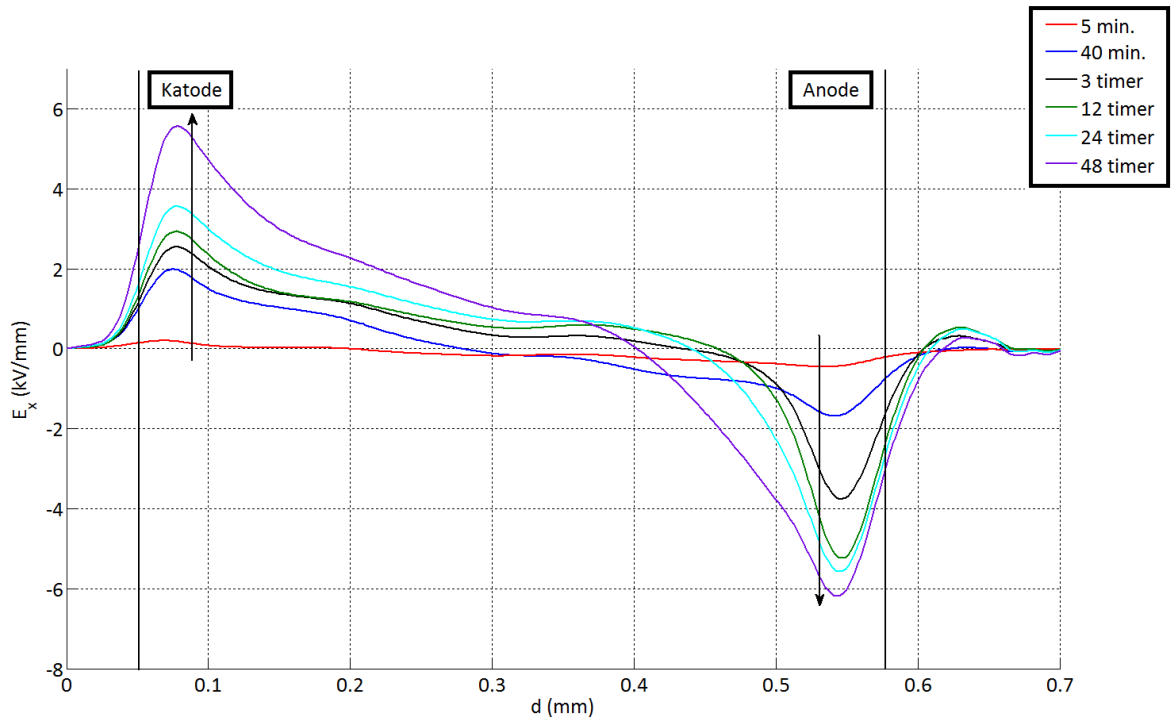
#### Romladningsakkumulasjon og elektrisk feltutvikling de første 48 timene

Figur 3-9 viser romladningsutviklingen frem til to døgn. Ved katoden i grensesjiktet mellom elektrode og isolasjon observeres akkumulasjon av heteroladninger helt frem til 48 timer, en raskere utvikling skjer de første 40 minuttene, og deretter nært tilsvarende fra 24 til 48 timer. I nærheten akkumuleres homoladninger med tilsvarende utvikling tidsmessig, men av mindre mengde i forhold til i grensesjiktet. I bulk er det antydning til akkumulasjon negativ romladning. I nærheten av anoden utvikles heteroladninger markant frem til 12 timer, hvorpå utviklingen reverseres og forskyves ut mot bulk. I grensesjiktet ved anoden mellom elektrode og isolasjon øker akkumulasjon av homoladninger frem til 12 timer, deretter holder verdien seg tilnærmet stabil frem til 48 timer.



Figur 3-9 - Romladningsakkumulasjon i testobjekt #3

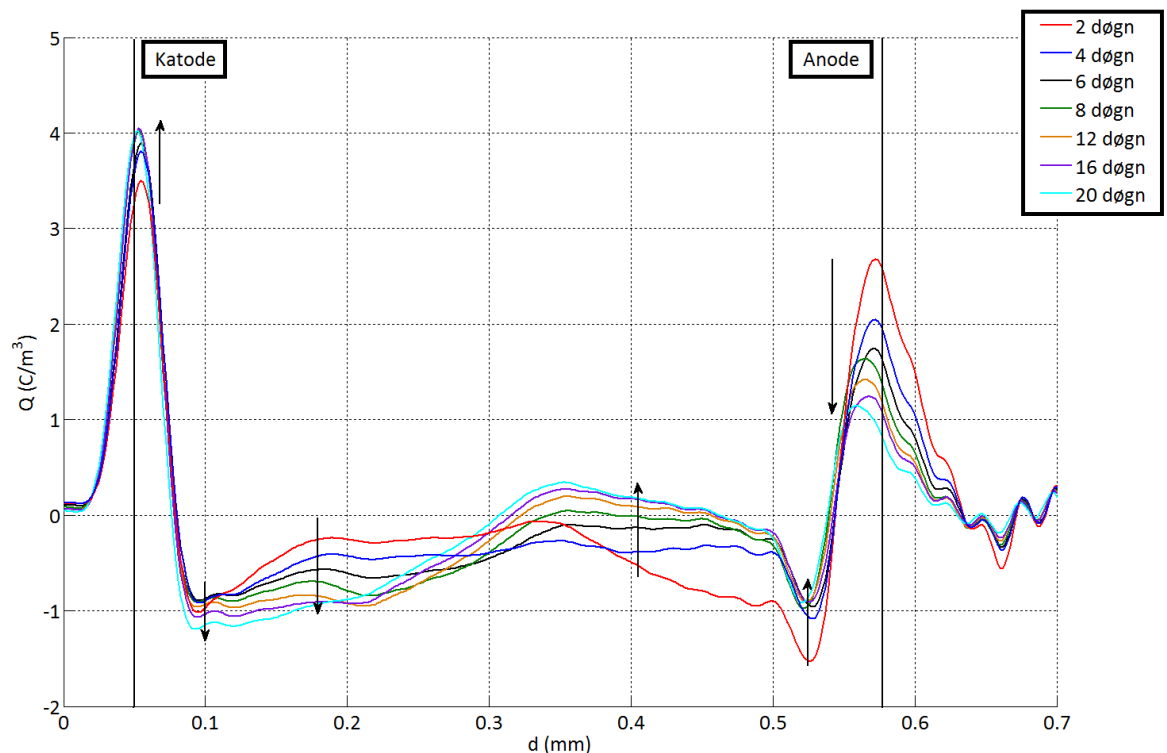
Korresponderende utvikling for elektrisk feltfordeling er vist i Figur 3-10. Ved elektrodene utvikles den elektriske feltforsterkningen jevnt fra start til 48 timer, positiv polaritet ved katode og negativ polaritet ved anode. Forsterkningen er noe høyere mot anoden. Etter 40 minutter observeres en feltfordeling symmetrisk om midten av testobjektet. Deretter er den elektriske feltforsterkningen noe forskjøvet mot katoden.



Figur 3-10 - Elektrisk feltutvikling for testobjekt #3

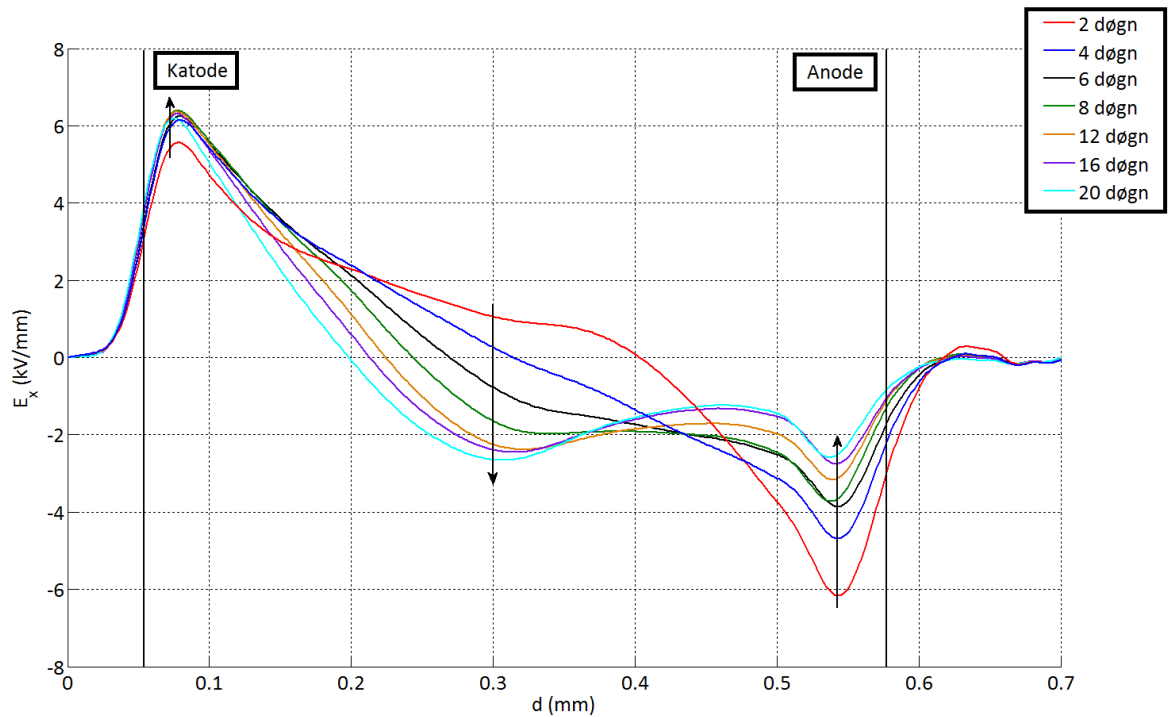
**Romladningsakkumulasjon og elektrisk feltutvikling fra to døgn til 20 dager**

Utviklingen av romladningsakkumulasjonen frem til 20 dager er presentert i Figur 3-11. I grensesjiktet ved katoden mellom elektrode og isolasjon øker andel heteroladninger frem til 12 dager, hvorpå akkumulasjonen stabiliseres. I nærheten av elektroden minker andel homoladninger fra to døgn, og holder seg nært uforandret fra fire til åtte dager. Deretter øker utviklingen frem til 20 dager. I bulk utvikles felt med henholdsvis homoladninger mot katoden, og heteroladninger mot anoden helt frem til 20 dager, i midten av materialet skjer et skifte etter seks dager. I nærheten av anoden minker andel heteroladninger frem til seks dager. Frem til 20 dager oscillerer responsen nært stabilt, men ved sensitivitetsgrensen. I grensesjiktet ved anode mellom elektrode og isolasjon minker feltet med homoladninger frem til 20 dager.

**Figur 3-11 - Romladningsutvikling for testobjekt #3**



Korresponderende utvikling for elektrisk feltfordeling er vist i Figur 3-12. Ved katoden er det elektriske feltet av positiv polaritet, og det er en økning frem til åtte dager. Deretter er det antydning til reduksjon frem til 20 dager, med verdier er nært opptil sensitivitetsgrensen. I midten av bulk observeres en overgang fra positiv til negativ polaritet på feltutviklingen, etter seks dager. Ved anoden reduseres feltforsterkningen frem til 20 dager. Reduksjonen er raskest fra to til fire dager. Maksimal feltforsterkning observeres ved katoden etter åtte dager, og er 16,3 % av påtrykket elektrisk felt. Ved anoden oppstår en feltøkning nært opptil maksimal feltforsterkning, 15,7 %, etter 48 timer.

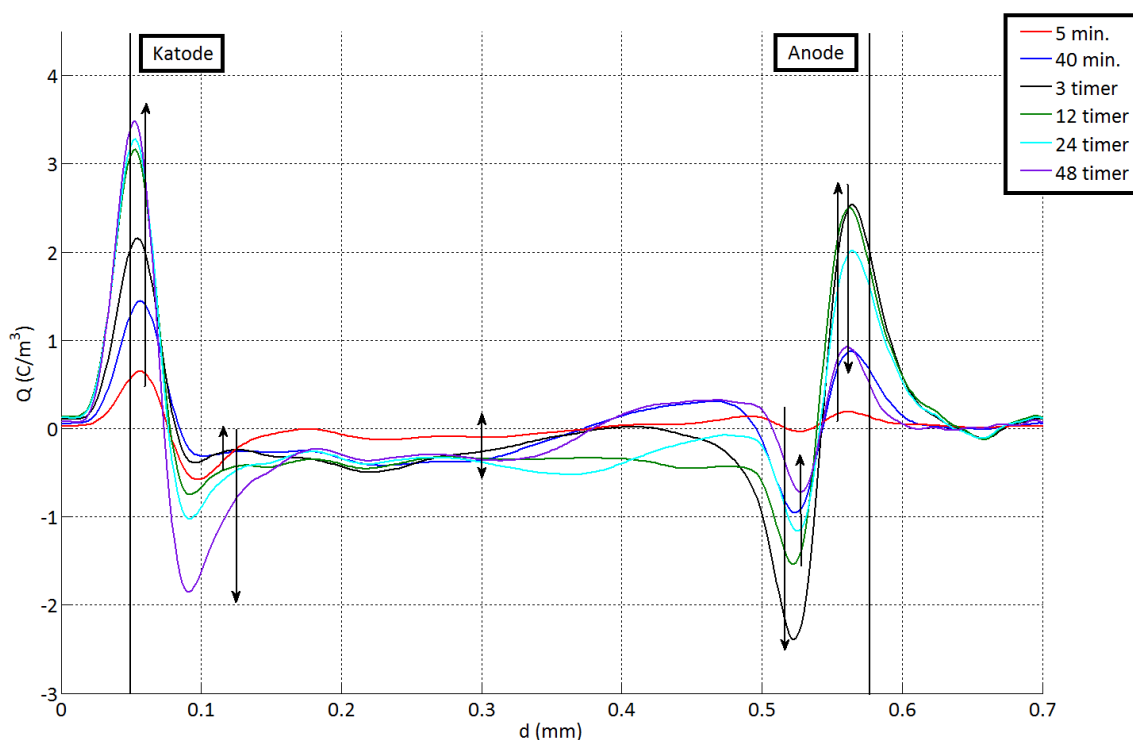


Figur 3-12 - Elektrisk feltutvikling for testobjekt #3

### 3.1.5 Testobjekt #4 – 49,0 kV/mm

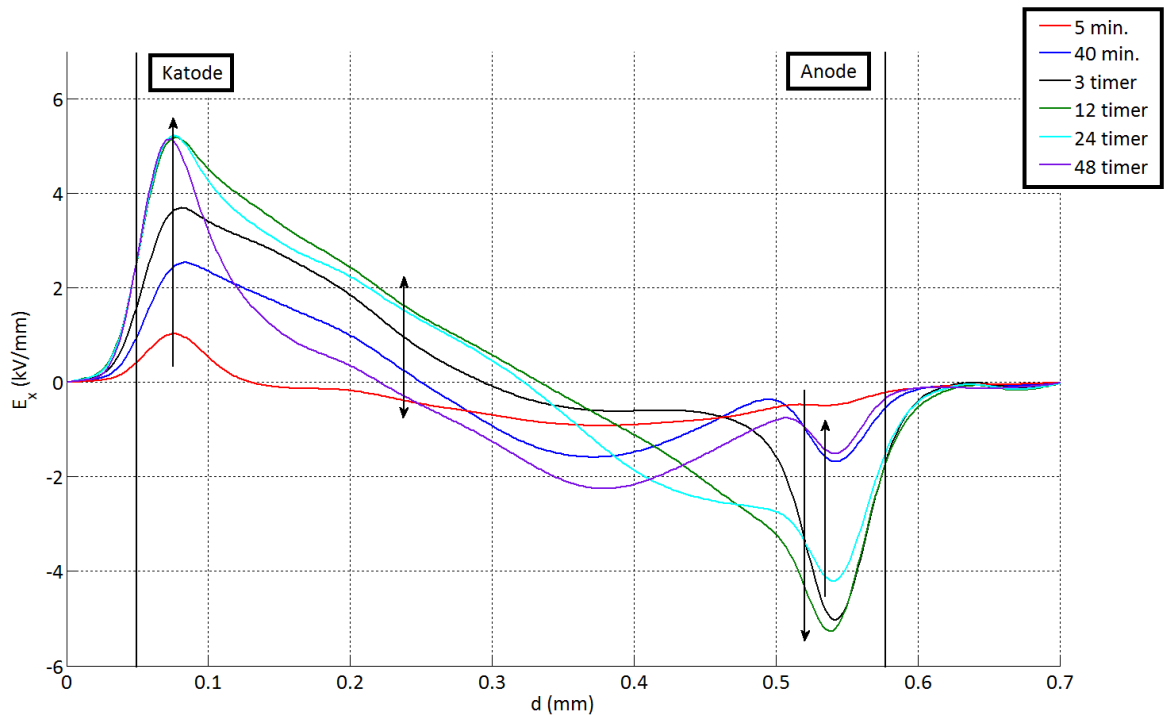
#### Romladningsakkumulasjon og elektrisk feltutvikling de første 48 timene

Figur 3-13 viser utviklingen av romladningsakkumulasjon frem til 48 timer. I grensesjiktet ved katode mellom isolasjon og elektrode observeres rask akkumulasjon av heteroladning, utviklingen er raskest de første 12 timer. I nærheten av katoden observeres et klart felt med homoladninger. Fra fem til 40 minutter reduseres andelen, før det igjen øker frem til 48 timer. I bulk mot katoden, er det antydning til økning av homoladninger frem til 12 timer, før det oscillerer mot reduksjon ved 48 timer. I bulk forskjøvet mot anoden er det antydninger til homoladninger, som skifter til heteroladninger etter tre timer, som skifter frem til 12 timer, før det igjen er homoladninger ved 48 timer. I nærheten av anoden observeres et markant område med heteroladninger, som øker frem til tre timer, før akkumulasjonen reduseres frem til 48 timer. I grensesjiktet ved anoden mellom elektrode og isolasjon akkumuleres homoladninger frem til tre timer. Deretter stagnerer nivået frem til 12 timer, før det reduseres frem til 48 timer.



Figur 3-13 - Romladningsutvikling for testobjekt #4

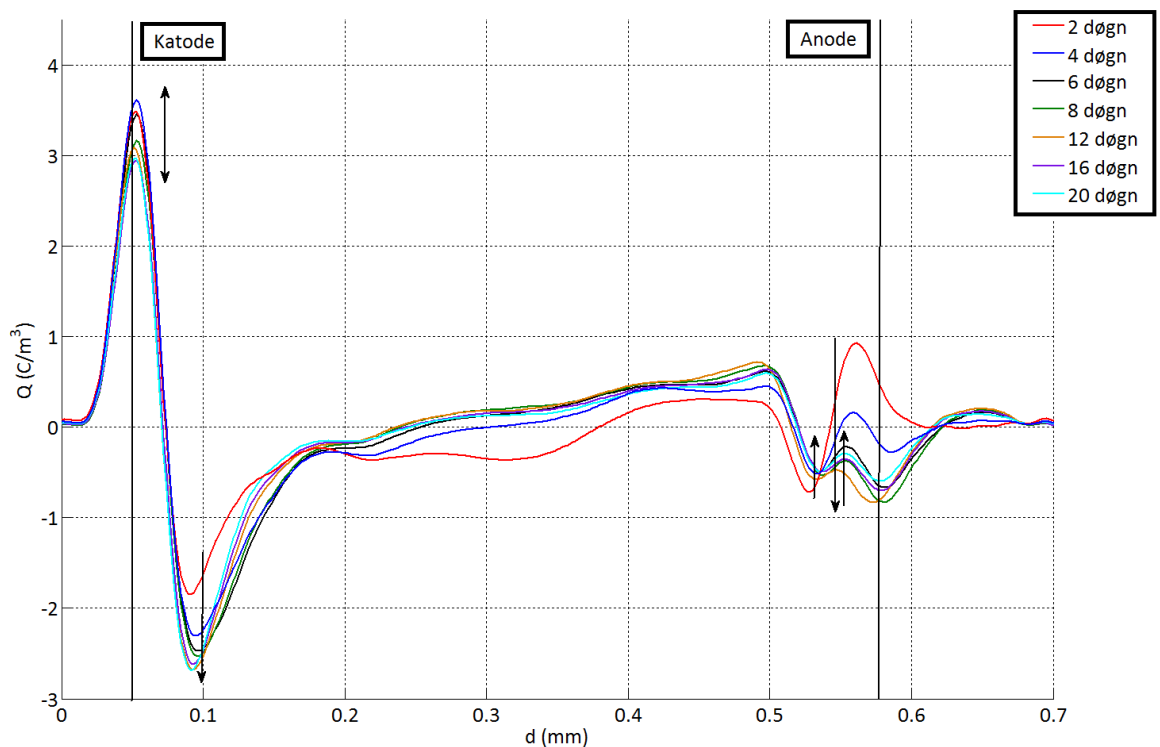
Korresponderende utvikling for elektrisk feltfordeling er vist i Figur 3-14. Ved katoden øker feltforsterkningen frem til 12 timer, hvorpå amplitudeverdien er tilnærmet uforandret frem til 48 timer. Inn mot bulk forskyves feltfordelingen av positiv polaritet inn mot midten av testobjektet frem til 12 timer, før feltet skifter tilbake, og blir dominert av felt med negativ polaritet. Ved anoden øker feltforsterkningen frem til 12 timer, deretter reduseres frem til 48 timer.



Figur 3-14 - Elektrisk feltutvikling for testobjekt #4

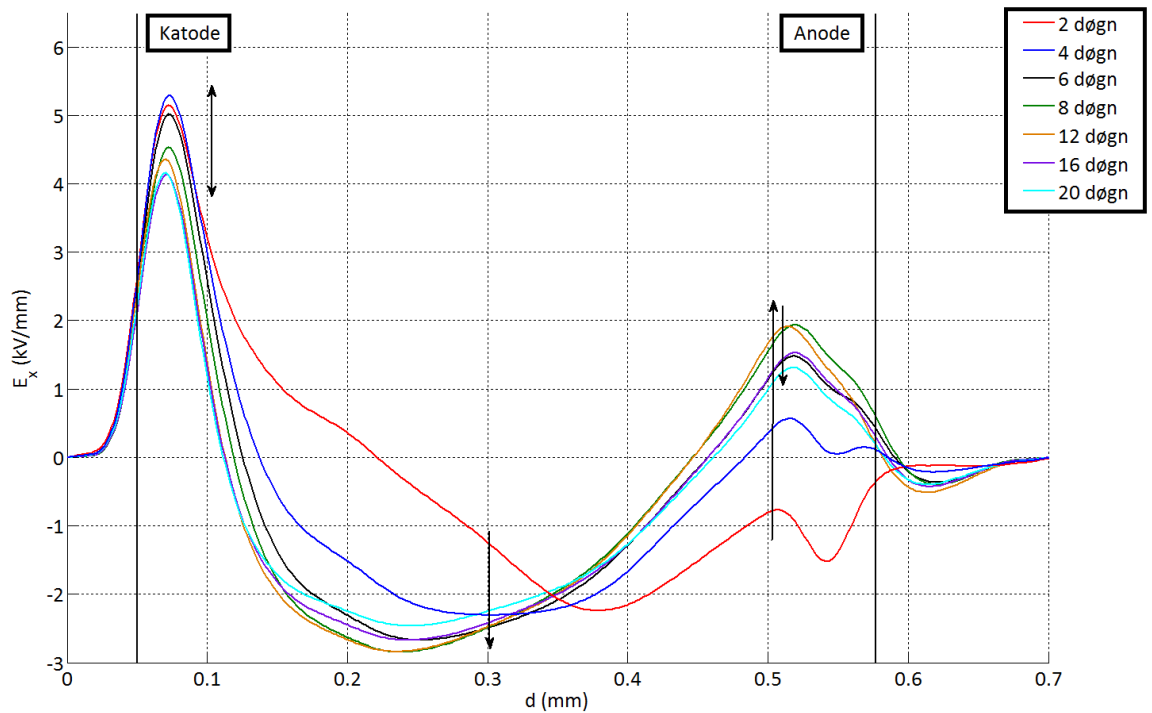
### Romladningsakkumulasjon fra to døgn til 20 dager

Figur 3-15 viser romladningsutviklingen frem til 20 dager. I grensesjiktet ved katode mellom elektrode og isolasjon øker akkumulasjonen av heteroladninger og når maksimal amplitudeverdi etter fire dager. Deretter observeres en reduksjon i regionen frem til 20 dager. I nærheten øker akkumulasjonen av homoladninger frem til 20 dager, raskest utvikling observeres fra to til fire dager. Utover i bulk utvikles regioner med homoladninger forskjøvet mot anoden. Ved anoden reduseres andel av heteroladninger, samtidig som området i grensesjiktet til anoden skiftes fra homoladninger til heteroladninger, markant etter seks dager. Maksimal amplitudeverdi ligger mellom åtte og 12 dager, før det er en liten reduksjon igjen frem til 20 dager.



Figur 3-15 - Romladningsutvikling for testobjekt #4

Korresponderende utvikling for elektrisk feltfordeling er vist i Figur 3-16. Ved katoden er det en økning i feltforsterkningen. Maks amplitudeverdi oppnås etter fire dager, før feltet reduseres frem til 16 dager, og oscillerer frem til 20 dager. I bulk øker feltforsterkningen og feltet forskyves mot katoden fra to til 12 dager, før en reduksjon observeres frem til 20 dager. Ved anoden går feltfordelingen fra negativ til positiv polaritet fra 2 til fire dager. Deretter øker feltet, maksimal amplitudeverdi ligger mellom åtte og 12 dager, før det er en reduksjon frem til 20 dager. Maksimal feltforsterkning oppstår etter fire dager ved katoden, og er 10,7 % av påtrykket elektrisk felt.



Figur 3-16 - Elektrisk feltutvikling for testobjekt #4

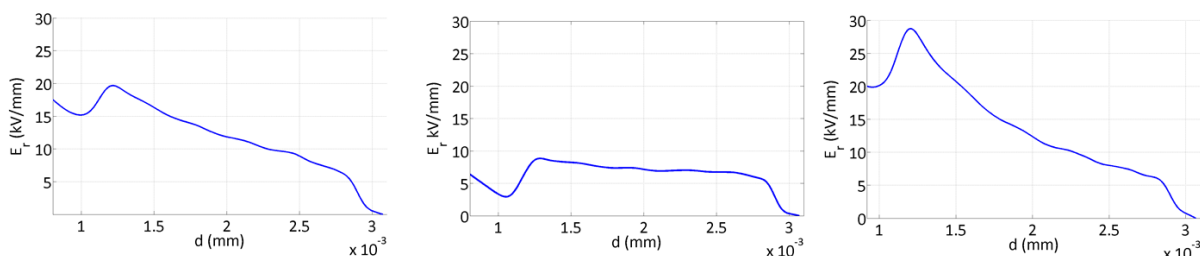
### 3.2 Miniatyrkabel

Tre måleserier er gjennomført på miniatyrkabel. Alle måleseriene ble utført som beskrevet i kapittel 2.4. Kalibrering ble gjennomført med positiv og negativ DC-spenning,  $\pm 0$ , 17,5 og 25 kV, henholdsvis 0, 10 og 14,3 kV/mm. For å eliminere romladning som oppstår i kalibreringsprosessen, avstresses systemet i 24 timer, før nye 0 kV målinger tas og måleserien settes i gang. Ytterligere informasjon om måleseriene er gitt i Tabell 3-3.

**Tabell 3-3 – Oversikt over gjennomførte måleserier på miniatyrkabel. Miniatyrkabelens bestanddeler er beskrevet i Tabell 3. Radiell elektrisk feltstyrke er beregnet fra formel (4), gjennomsnittlig elektrisk feltstyrke er beregnet fra formel (5).**

Miniatyrkabel	#K1	#K2	#K3
Påtrykket DC-spenning [kV]	35	52,2	70
Radiell elektrisk feltstyrke $r_{indre}$ [kV/mm]	32,9	49,1	65,8
Radiell elektrisk feltstyrke $r_{ytre}$ [kV/mm]	13,0	19,6	26,1
Gjennomsnittlig elektrisk feltstyrke [kV/mm]	20	30	40

Samtlige måleserier er gjennomført over en tidsperiode på 21 døgn. Grunnet problemer med oppsettet, er presenterte måleserier ikke systematiske i forhold til tidsutviklingen. Det bemerkes at plasseringen av katode (ytte elektrode) og anode (indre elektrode) er omvendt i forhold til presenterte måleserier for flate testobjekt. Profilene for elektrisk feltfordeling er ikke fullstendig representative for reell utvikling, kun generelle trender observeres derfor fra disse.

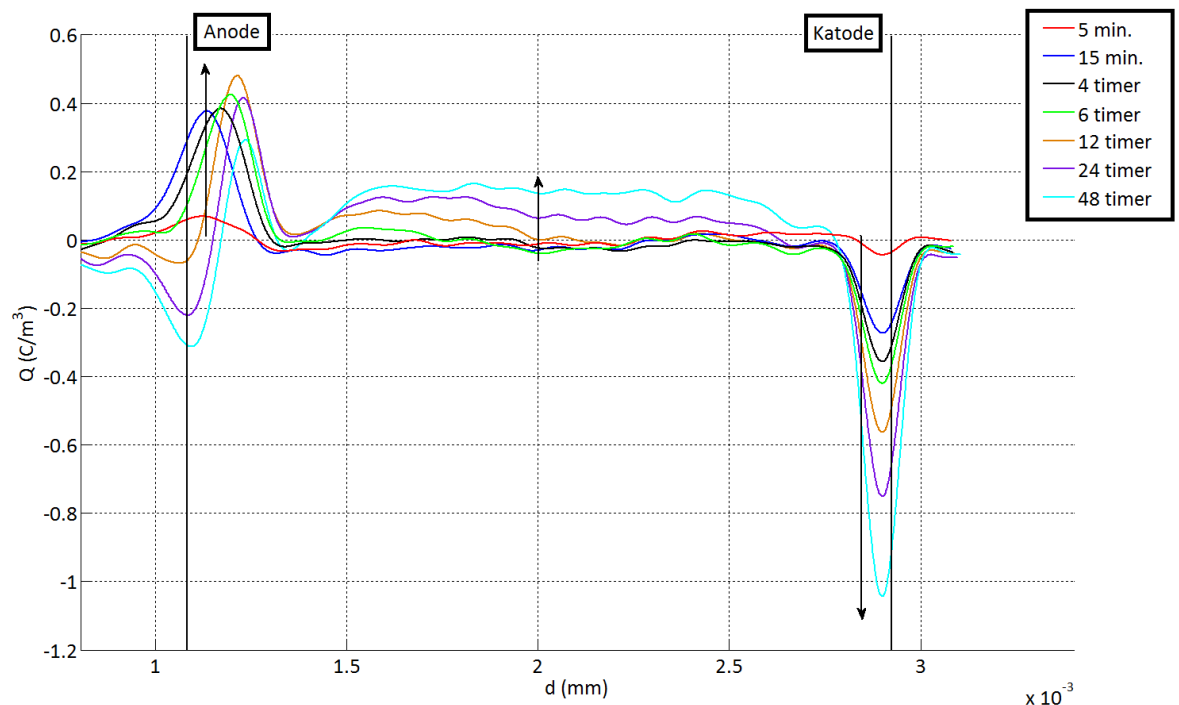


**Figur 3-17 – Kalibreringsdata ved påtrykket 25 kV for samtlige måleserier. Reelt sett skulle feltprofilene være tilnærmet like, og gått i null ved anoden som illustrert i Figur 0-7.**

### 3.2.1 Måleserie #K1 – 20 kV/mm

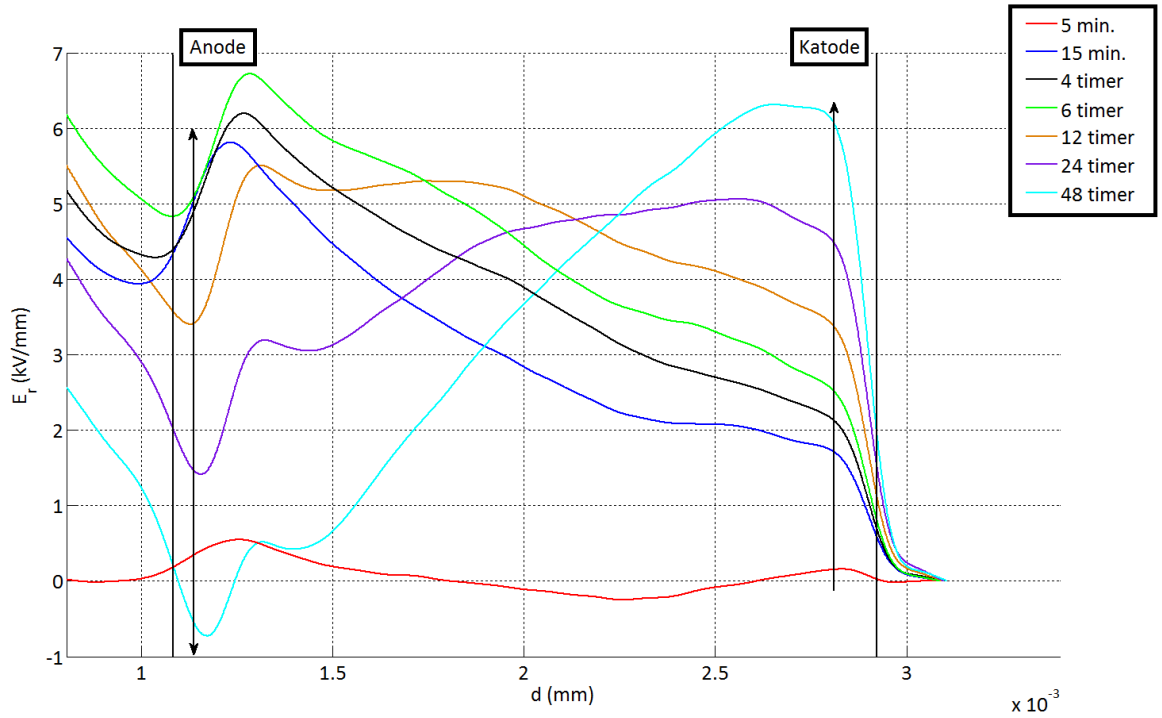
#### Romladningsakkumulasjon og elektrisk feltutvikling fra fem minutter til 48 timer

Figur 3-18 viser romladningsakkumulasjonen frem til 48 timer. Ved begge elektroder er det tidlig antydning til homoladningsakkumulasjon, i grensesjiktet ved katoden er akkumulasjonen raskere og av høyere verdi. I grensesjiktet ved anoden forskyves feltet med homoladninger mot bulk, og et skifte til akkumulasjon av heteroladninger skjer i grensesjiktet, markant etter 24 timer. I bulk er responsen preget oscillering, hvorpå utviklingen går mot akkumulasjon av romladning av positiv polaritet.



Figur 3-18 – Romladningsakkumulasjon for miniatyrkabel #K1, fra fem minutter til 48 timer.

Figur 3-19 viser elektrisk feltutvikling for tilsvarende tidsperiode. Ved anoden observeres en feltøkning frem til seks timer, hvorpå en reduksjon skjer frem til 48 timer. I nærheten av katoden er en markant lokal feltforsterkning. Ved katoden observeres forsterkning av det elektriske feltet frem til 48 timer.

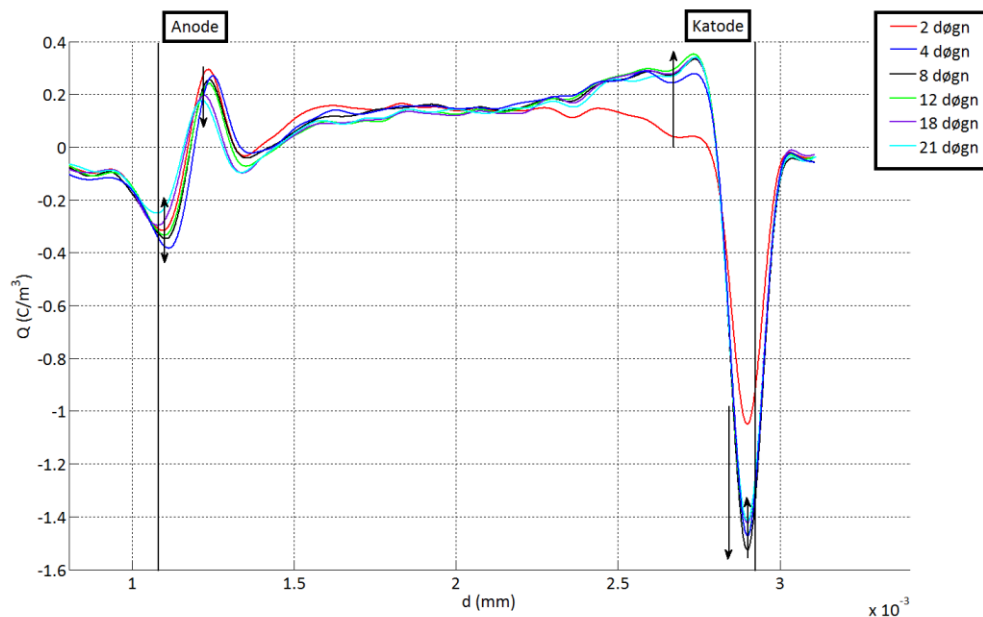


Figur 3-19 – Elektrisk feltutvikling for miniatyrkabel #K1, fra fem minutter til 48 timer.



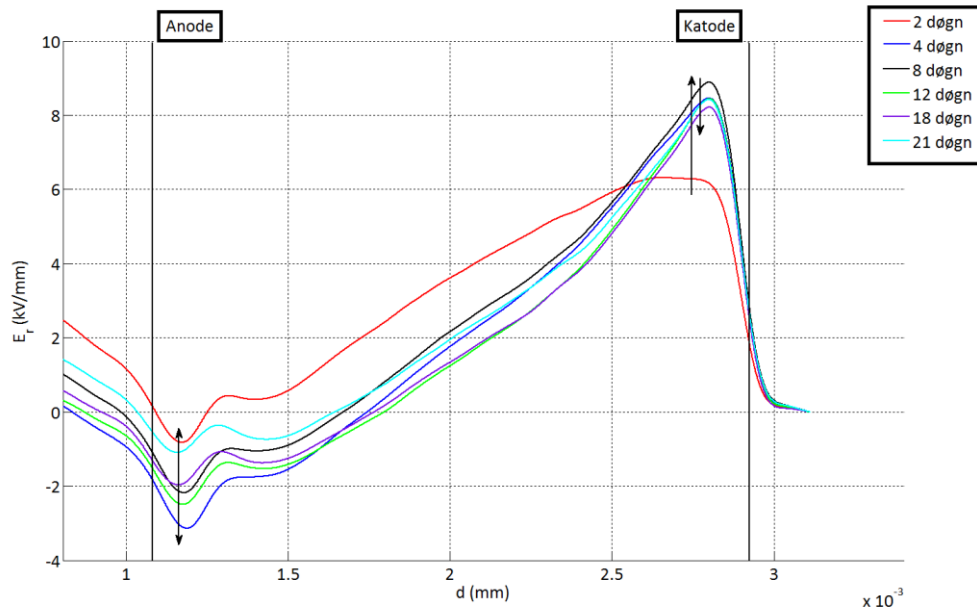
### Romladningsakkumulasjon og elektrisk feltutvikling fra to døgn til 21 døgn

Figur 3-20 viser romladningsakkumulasjon frem til måleserieavslutning. I grensesjiktet ved anoden øker akkumulasjon av heteroladninger frem til fire døgn, hvorpå en reduksjon observeres frem til 21 døgn. I nærheten av anoden reduseres feltet med heteroladninger frem til 21 døgn. I grensesjiktet ved katoden øker akkumulasjonen av homoladninger frem til åtte døgn, hvorpå en reduksjon observeres frem til 21 døgn. I nærheten av katoden er det antydning til et heteroladningsfelt, som øker markant fra to til åtte døgn, deretter er utviklingen nært stabilt frem til 21 dager. Romladningsfeltet i bulk er nært stabilt frem til måleserieslutt.



Figur 3-20 - Romladningsakkumulasjon for miniatyrkabel #K1, fra to døgn til 21 døgn.

Figur 3-21 viser elektrisk feltutvikling for tilsvarende tidsperiode. Ved anoden øker feltforsterkningen frem til fire døgn, hvorpå en reduksjon observeres frem til 21 dager. Mot katoden øker feltstyrken frem til åtte døgn, hvorpå en reduksjon observeres frem til 18 døgn, mot 21 dager oppstår en ytterligere økning.



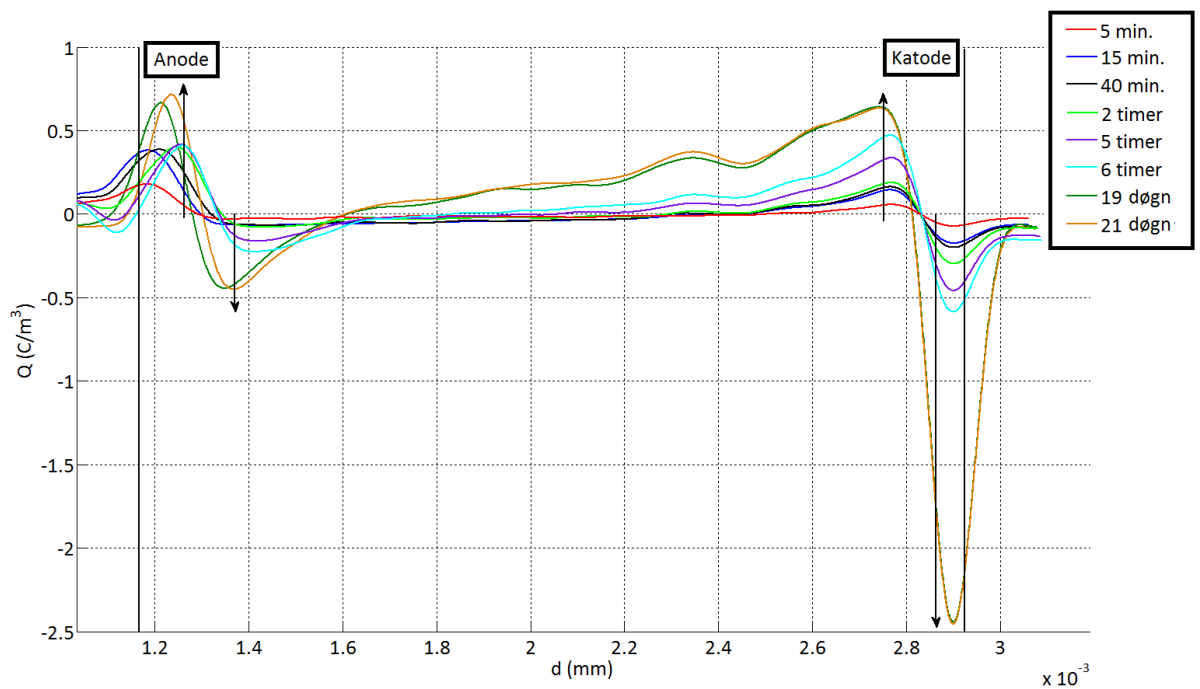
Figur 3-21 - Elektrisk feltutvikling for miniatyrkabel #K1, fra to døgn til 21 døgn.

### 3.2.2 Måleserie #K2 – 30 kV/mm

#### Romladningsakkumulasjon og elektrisk feltutvikling fra fem minutter til 21 døgn

Figur 3-22 viser romladningsakkumulasjonen fra start til slutt av måleserien. Ved begge elektroder akkumuleres homoladninger raskt etter at måleserien startes. Ved anoden forskyves elektrodetoppen mot bulk, markant mellom 15 minutter og seks timer. I nærheten av begge elektroder utvikles markerte felt med heteroladninger, utviklingen er større ved katoden. I bulk er det antydninger til ladninger av positiv polaritet, forskjøvet mot katode.

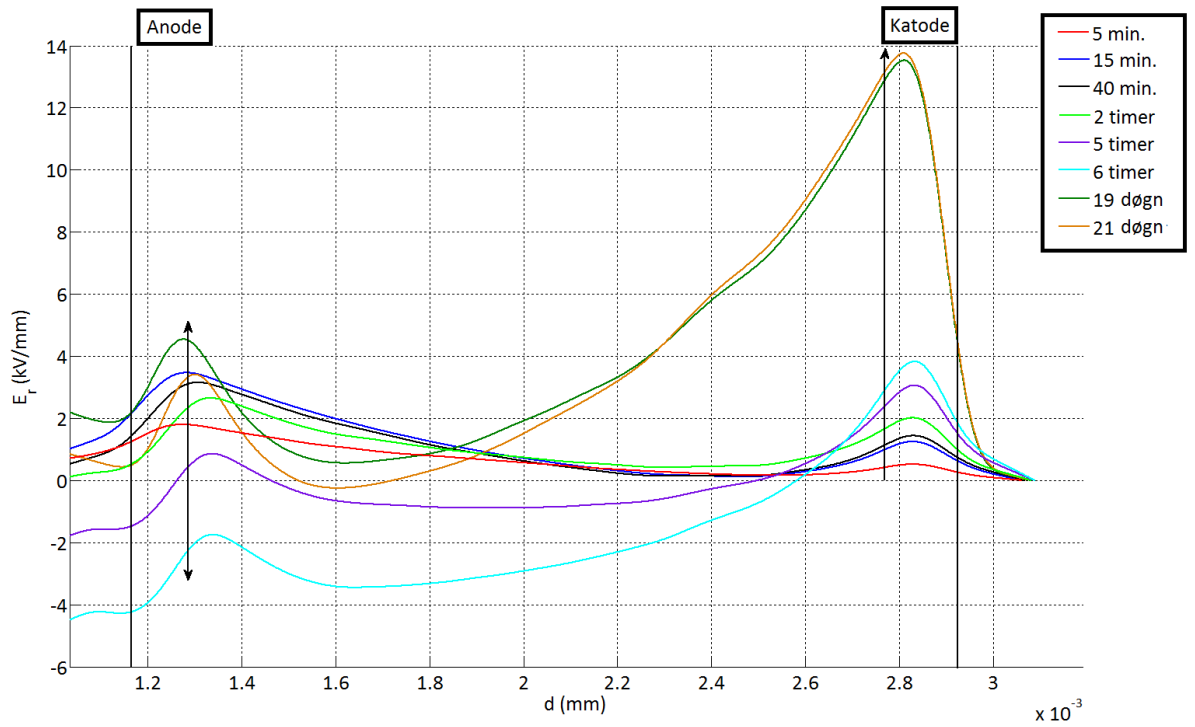
Mot måleserieslutt er regionen med homoladninger i grensesjiktet ved katoden markant større enn i grensesjiktet ved anoden. Mot begge elektroder er det felt med heteroladninger, av større verdi ved katoden. I bulk observeres akkumulasjon av positive romladninger, forskjøvet mot katoden.



Figur 3-22 - Romladningsakkumulasjon for miniatyrkabel #K2, fra fem minutter til 21 døgn.

Figur 3-23 viser utviklingen av elektrisk feltfordeling for tilsvarende tidsperiode. Ved anoden øker feltet de første 15 minuttene. Deretter reduseres feltforsterkningen frem til seks timer. Ved katoden observeres en jevn økning fra fem minutter til seks timer.

Mot slutten av måleserien observeres en lokal feltforsterkningstopp ved anoden. Ved katoden er feltforsterkningen markant, og maksimal feltforsterkning er etter 21 døgn.

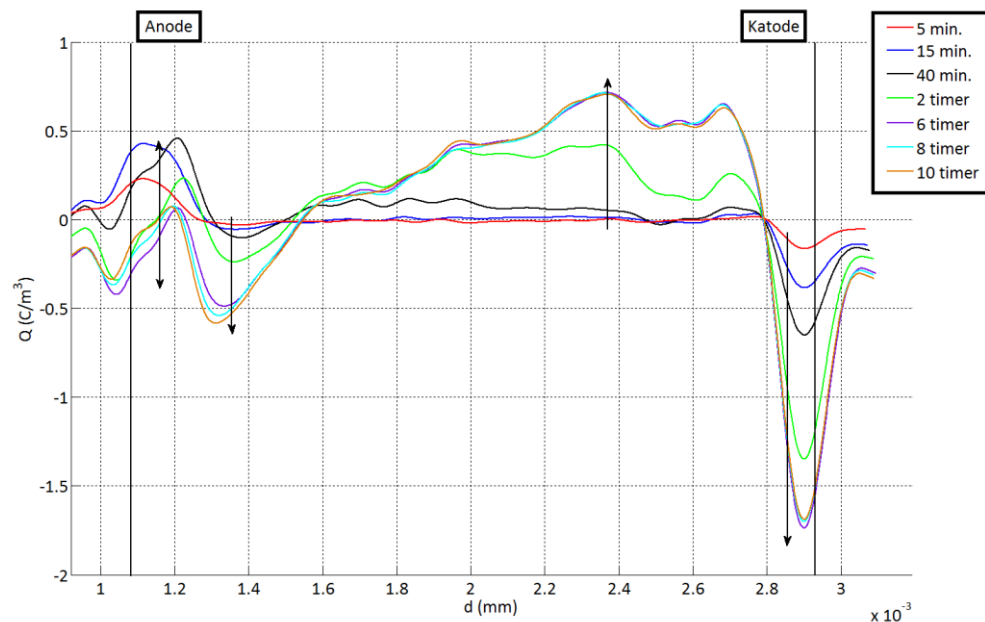


Figur 3-23 - Elektrisk feltutvikling for miniatyrkabel #K2, fra fem minutter til 21 døgn.

### 3.2.3 Måleserie #K3 – 40 kV/mm

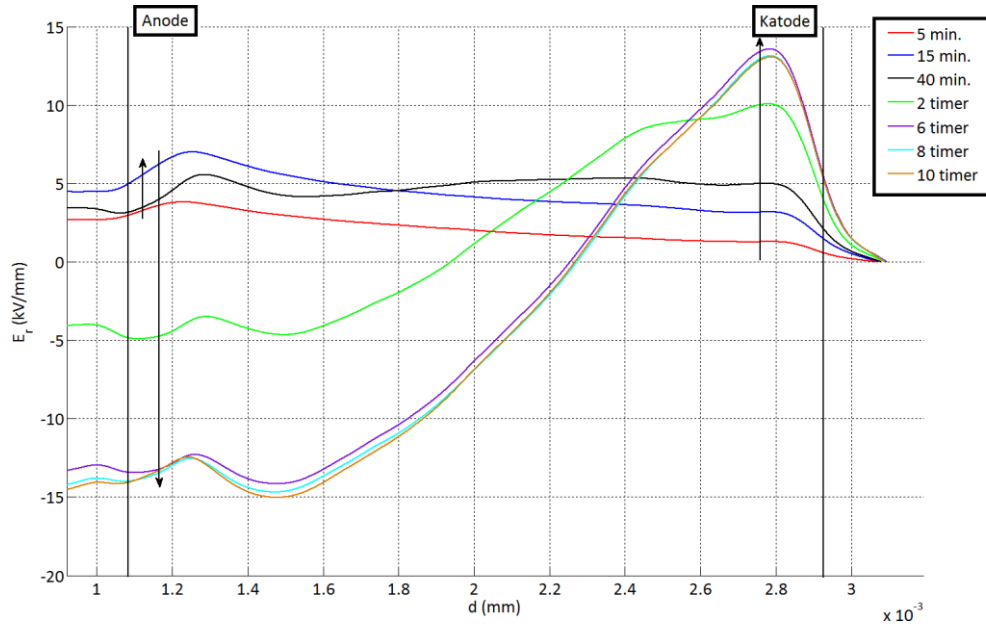
#### Romladningsakkumulasjon og elektrisk feltutvikling fra fem minutter til 10 timer

Figur 3-24 viser romladningsakkumulasjonen fra fem minutter til ti timer. I grensesjiktet mellom elektrode og isolasjon ved anoden, er det antydning til akkumulasjon av homoladninger frem til 40 minutter. Deretter gir utviklingen indikasjon på at det er i et skifte mot romladningsakkumulasjon av negativ polaritet. Ved anoden er det antydning til utvikling av et felt med heteroladninger, markant etter to timer. I grensesjiktet ved katoden akkumuleres homoladninger jevnt fra fem minutter til seks timer. Deretter er utviklingen opp mot stabil frem til ti timer. I nærheten av katodene er det utvikles et felt med heteroladninger, markant etter to timer.



Figur 3-24 - Romladningsakkumulasjon for miniatyrkabel #K3, fra fem minutter til ti timer.

Figur 3-25 viser elektrisk feltfordeling for tilsvarende tidsperiode. Ved anoden øker feltforsterkningen de første 15 minuttene før en reduksjon utvikles frem til ti timer. Ved katoden øker feltforsterkningen frem til seks timer, hvorpå det er antydning til reduksjon frem til ti timer.



Figur 3-25 - Elektrisk feltutvikling for miniatyrkabel #K3, fra fem minutter til ti timer.

## 4. Diskusjon

Hovedformålet med denne oppgaven har vært å kartlegge romladningsakkumulasjon og den medførende elektriske feltutviklingen. I presenterte måleserier av romladningsutvikling, skal det understrekes at figurene er netto ladningsprofiler. Det er ikke mulig å avgjøre type ladningsbærer eller hvilke konduktivitetsmekanismer som er aktive.

I dette avsnittet vil resultatene av utførte måleserier på henholdsvis flate testobjekt og miniatyrkabel diskuteres opp mot teoretisk bakgrunn med referanser til lignende forskningsresultater.

### 4.1 Flate testobjekt

I testobjektene #1 og #2, vist i Figur 3-1 og Figur 3-5, observeres relativt raskt akkumulasjon av homoladninger i grensesjiktet mellom elektrodene og isolasjonen. Generelt er det antatt at disse feltene kan oppstå som følge av elektroninjeksjon eller ekstraksjon (hullinjeksjon), grunnet enten Schottky-mekanismen eller Fowler-Norheim-tunnelling [30, 31].

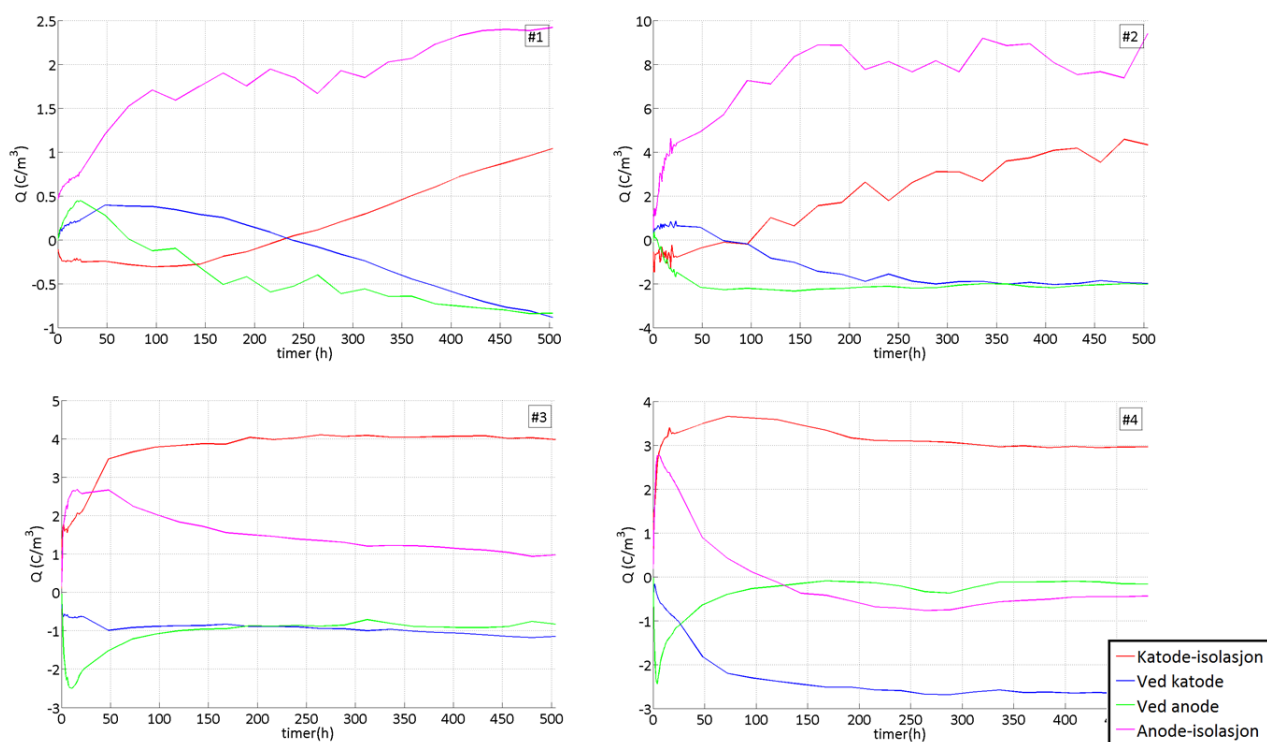
Ved katodene i begge testobjekter reverseres akkumulasjonen, og går mot heteroladninger. Dette skjer allerede etter 40 minutter i testobjekt #2, mot 48 timer i testobjekt #1. Likevel oppnår førstnevnte en netto akkumulasjon av homoladninger opp mot tre ganger så høyt, trolig grunnet økt injeksjonsrate ved høyere påtrykket elektrisk felt.

Akkurat hva som forårsaker skiftet av akkumulasjonen ved katodene i testobjekt #1 og #2 er uklart. Som nevnt i teorien er konduktivitetsmekanismene og injeksjon avhengig av en rekke faktorer, og følgelig vanskelig å avgjøre hvilke mekanismer som er aktive. Likevel kan skiftet være en indikasjon på at inhomogen konduktiviteten og økt ladningsinjeksjon i testobjektet, vil akselereres ladningstransporten som følge. Utviklingen skjer over tid, er trolig avhengig av påtrykket elektrisk feltstyrke. Det er ikke mulig å avgjøre hvorvidt utviklingen av ladningsinjeksjonen skjer som følge av Fowler-Norheim- og/eller Schottky-injeksjon.

I grensesjiktet mellom elektrode og isolasjon ved katodene i testobjekt #3, Figur 3-9 og testobjekt #4, Figur 3-13, observeres det akkumulasjon av positiv romladning allerede etter fem minutter. Utviklingen er analog i begge testobjekter, men av høyere netto verdi ved høyere elektrisk feltstyrke. Basert på utviklingene i romladningsprofilene, kan det antas de elektriske feltstyrkene kan gi opphav til høyere injeksjonsrate og mobilitet av ladningsbærere, slik at transporten i teorien vil kunne gå hurtig PEX [5, 7]. I tillegg indikerer resultatene langt mindre akkumulert romladning i bulk, enn ved lavere feltstyrker, som kan være indikasjon på at flere konduktivitetsmekanismer, som Poole-Frenkel-mekanismen, termisk aktivert hopping og/eller tunnelling [13], er aktive ved høyere feltstyrker.

I nærheten av katoden i testobjekt #1 og #2 er det rask akkumulasjon av positive ladninger, nært samsvarende til utviklingen i grensesjiktet. Som nevnt i teorien vil tilsetningsstoffer og restprodukter være tilstede i materialet. Ved ionisering av disse urenheterne, eventuelt ved ionisk polarisering, vil de ved påtrykket elektrisk felt migrere mot elektroden av motsatt polaritet, hvor de former heteroladninger [13, 21]. Siden ioner ikke vil kunne passere igjennom elektrodene, vil de bli gjenværende som akkumulert romladning [5, 7, 15]. En alternativ forklaring kan være grunnet utviklingen som observeres utover i bulk. Særlig i testobjekt #1, men også antydnet i testobjekt #2, observeres ladningsakkumulasjon av negative ladninger, forskjøvet mot anoden. Dette kan være migrasjon av elektroner mot anoden, som følgelig vil gi opphav til regioner med hull eller ioniserte donorer [31], mot katoden.

Under forutsetning om at testobjektene har tilnærmet like materialparametere, og at ionisk transport generelt går tregere enn elektronisk transport, kan man anta at andel ioniserte urenheter ikke vil dominere i romladningsprofilene ved elektrodene kort etter måleseriestart [7, 9]. Basert på romladningsutviklingen over tid for testobjekt #1 og #2, presentert i Figur 4-1, er utviklingen i grensesjiktet og ved katoden, nært symmetrisk. Dette kan gi en indikasjon på at regionene er som følge av elektronmigrasjon, eller alternativt akkumulerte ioner [13]. Det observeres en liten differanse i symmetrien, markant i testobjekt #1 etter 50 timer, som kan indikere en kombinasjon av begge fenomener. På grunnlag av måleusikkerheten i testoppsettet er dette usikkert.



Figur 4-1 – Romladningsakkumulasjon over tid, ved gitt plassering i nummerte flate testobjekt.

Ved anodene i samtlige testobjekt observeres en utvikling av homoladninger i grensesjiktet mellom elektrode og isolasjon, og en nært samsvarende utvikling av heteroladninger i



nærheten. Heteroladningsregioner kan oppstå som følge av at elektroden delvis blokkerer ekstraksjonen av mobile ladningsbærere [5, 15], men dette er ikke samsvarende med utviklingen i testobjekt #1, hvor en økning i akkumulasjon av positive homoladninger i grensesjiktet ved anoden, gir indikasjon på elektronekstraksjon. I testobjekt #2 og #3, vist i Figur 3-11 og Figur 3-15, observeres noe reduksjon frem til måleslutt i grensesjiktet, hvor differansen er større ved økt påtrykket spenning. Dette kan være en indikasjon på at ekstraksjonsraten er lavere enn injeksjonsraten ved katoden, og underbygges ved stabiliseringen av heteroladningsfeltet i testobjekt #2, samt utviklingen av en negativ romladningsregion i bulk i testobjekt #3.

Utviklingen ved anoden i testobjekt #4 er ulik de andre testobjektene. Akkumulasjonene av heteroladninger øker kun frem til tre timer, før en reduksjon observeres frem til fire dager, deretter er verdien nært stabil. I grensesjiktet er det kun økning av homoladninger frem til seks timer, før akkumulasjonen er tilsynelatende fullstendig reversert til akkumulasjon av heteroladninger, etter seks dager. Dette kan være en ytterligere indikasjon på injeksjonsraten ved katoden er raskere enn ekstraksjonsraten ved anoden. Utviklingen kan være som følge av at elektroner rekombineres i regionen med hull, og netto romladningsakkumulasjon går det mot et overskudd av elektroner [21, 30, 32]. Dette kan underbygges av utviklingen som observeres i bulk, hvor feltet går mot akkumulasjon av positiv romladning.

Figurene med romladningsakkumulasjon over tid, gir indikasjon på at akkumulasjonen vil stabiliseres over tid [11]. Det viser også at positive ladninger akkumuleres i større grad enn negative ladninger, som kan underbygge teorien at elektrontransport og ekstraksjon er raskere enn akkumulasjon av positive ladningsbærere og/eller injeksjon av hull. Det skal bemerkes at figurene viser utvikling i et gitt punkt, slik at lokale forskyvninger ikke er medberegnet.

Som nevnt i teorien kan lokal elektrisk feltforsterkning i isolasjonen være særlig kritisk i forbindelse med aldringsmekanismer og gjennomslag. Måleseriene gir indikasjon på at heteroladninger vil bidra til elektrisk feltforsterkning, og homoladninger vil påvirke omvendt [7, 17]. Over tid vil romladning hovedsakelig akkumuleres ved elektrodene, slik at maksimal feltforsterkning oppstår der [33].

Det bemerkes at maksimal prosentvis elektrisk feltforsterkning observeres i testobjekt #2, Figur 3-8, allerede etter åtte dager. Det vil være som følge av at de største romladningsdifferansene oppstår i testobjekt #2, og som følge vil både elektronisk og ionisk transportmekanismer kunne være aktive, eller aktiveres som følge av total elektrisk feltfordeling (Formel (6)).

I romladningsprofilen for testobjekt #2 er det ikke mulig å avgjøre med sikkerhet om det er romladningsakkumulasjon i bulk. Likevel gir oscilleringen i den elektriske feltutviklingen, særlig de første 48 timene i Figur 3-6, indikasjon på at det kan være ladningsbevegelse i regionen.

Elektrisk feltutvikling for testobjekt #3 i Figur 3-12 og #4 i Figur 3-16, følger mer analoge trender i begynnelsen av måleseriene, i forhold til det som er observert tidligere. Fordelingen er mer symmetrisk om midten av testobjektene, som følge av en jevnere utvikling av

romladning ved elektrodene. Maksimal elektrisk feltøkning er likevel høyere i testobjekt #3, og oppnås både ved katode og anode, men med seks dagers mellomrom.

Mot slutten av måleserie #3 og #4 minker det elektriske feltet ved anoden. I testobjekt #4 er feltet preget av skiftet i romladningsakkumulasjonen. Feltet er av positiv polaritet etter fire dager, og følgelig skifter feltet i bulk, som følge av at polariteten ved begge elektroder går mot samme polaritet.

## 4.2 Miniaturkabel

Grunnet den koaksiale geometrien, tykkelsen på isolasjonen, faktorer som refleksjon, attenuasjon og dispersjon av propagerende akustiske bølger kan dette gi sterk innvirkning på resulterende romladnings- og elektrisk feltprofiler. Samtlige miniaturkabler er kappet fra samme testkabel, slik at utgangspunktet skal være likt. Likevel viser Figur 3-17 at måledataene ikke er fullstendige. For måleserie #K2 underestimeres den elektriske feltfordelingen med en faktor på 2.

Testobjekt #K1 er eneste måleserie med fullstendig datasett for romladnings- og elektrisk feltutvikling, derfor er sammenligningen av måleseriene med økende påtrykket spenningsnivå mindre omfattende enn diskusjonsdelen for flate testobjekt. For å forklare sammenhenger mellom observasjoner gjort på flate testobjekt og miniaturkabel, presenteres utviklingen fra katode mot anode for miniaturkabel.

I grensesjiktet mellom elektrode og isolasjon ved katode akkumuleres homoladninger i samtlige testobjekt. Ved katoden i samtlige måleserier akkumuleres negative ladninger langt raskere enn positive ladninger ved anoden. Dette kan være grunnet en raskere ladningsinjeksjon fra katoden, eller eventuelt at negative ladninger fanges lettere i feller enn positive ladninger [13, 34].

Som ved katoden, utvikles homoladninger i grensesjiktet ved anoden kort tid etter at måleseriene er startet. I testobjekt #K1, Figur 3-18, observeres romladning av negativ polaritet etter 24 timer. En tilsvarende utvikling observeres i testobjekt #K3 i Figur 3-24, hvor akkumulasjonen reverseres til netto negativ romladning, fullstendig etter seks timer. Da måledata kun går til ti timer, kan ikke denne trenden bekreftes, men dette kan likevel være en indikasjon på sammenheng med observasjonen gjort for flat testobjekt #4. Det kan antas at elektroner rekombineres i regionene med hull, og netto romladningsakkumulasjon går det mot et overskudd av elektroner [13]. Dette kan underbygges av utviklingen som observeres i bulk, hvor regionen i samtlige måleserier, domineres av romladning av positiv polaritet.

Feltene med positiv romladning i bulk kan være indikasjon på ioniserte urenheter, som ved påtrykket elektrisk feltstyrke migrerer mot elektroden av motsatt polaritet [34]. Dette kan underbygges ved at netto verdier er lave og at utviklingen er stabil og går gradvis mot katode i samtlige testobjekt. Alternativt kan det at dette utvikles som følge av migrasjonen av elektroner mot anoden, underbygget av høyere netto verdier av romladning i bulk i testobjekt #K3, Figur 3-24. Ved konduktivitetsmekanismer, vil elektroner kunne beveges mellom feller,

eksempelvis ioniserte donorer. Ved løsrivelsen kan dette gi opphav til netto akkumulasjon av positiv romladning.

Ved anoden i testobjekt #K2, Figur 3-22, er det antydning til forskyvning av elektrodetoppene. Dette kan være forårsaket av elastisitet i materialet, som følge trykket mellom miniatyrkabelen og klemmesystemet i PEA-målesystemet. Det observerer lignende fenomener i testobjekt #K1, Figur 3-18 og testobjekt #K3, Figur 3-24. I testobjekt #K3 kan forskyvningen være forårsaket av et skifte til utvikling av heteroladninger, som beskrevet for testobjekt #4. Da måleserie #K3 kun går frem til ti timer, kan en eventuell forskyvning ikke bekreftes.

Etter seks timer er netto ladningsakkumulasjon ved katoden tilnærmet likt i testobjekt #K1 og #K3, og av høyere verdi ved testobjekt #K2. Det bemerkes likevel at tilsynelatende maksimale amplitudeverdier på romladningsakkumulasjonen er av langt mindre verdier enn de observert for flate testobjekt. Dette er trolig grunnet forskjellen i morfologi, hvor overgangen i kontaktflaten mellom isolasjonen og halvlederelektroden vil være mer ujevn.

Profilene for elektrisk feltfordeling som er presentert i denne oppgaven, er som følge av romladningsakkumulasjonen. Maksimal feltforsterkning oppstår ved katoden, altså mot ytre halvleder. Dette oppstår som følge av at maksimal netto heteroladningsregioner akkumuleres mot katode [13], særlig markant i testobjekt #K3, Figur 3-25. Det bemerkes at i testobjekt #K1, Figur 3-21 og testobjekt #K2, Figur 3-23, etter 21 dager, observeres en langt større feltforsterkning enn hva som er observert i flate testobjekt, med langt større netto romladningsladningsakkumulasjon. Det er vanskelig å diskutere hva som kan være årsak til denne differansen, både grunnet forskjellig materialtype, testobjektsgeometri og elektrodemateriale [13, 21].

### 4.3 Feilkilder

Som en del av et større forskningsprosjekt har laboratorieundersøkelsene blitt utviklet underveis i forbindelse med praktisk oppsett og databehandling. På tross av at begge testoppsett er plassert i Faradaybur, vil miljøet kunne ha innvirkning, i forhold til støy og grunnet variasjon i temperatur.

#### 4.3.1 Flate testobjekt

Som beskrevet tidligere ble testobjektene #A, #B og #C terminert grunnet problemer. For testobjekt #A viste måleserien akkumulert romladning ved  $t=0$ , og derved feilaktig elektrisk feltutvikling. Problemet oppsto trolig grunnet en inhomogenitet i testobjektet, og ble derfor avsluttet tidlig. I tillegg til å bytte ut testobjektet, ble det valgt å skru til testcellen med 25 nm, fremfor 20 nm som gjennomført i prosjektoppgaven og for testobjekt #A. Det viste seg likevel at det var problemer med testobjekt #B. Oscilloskopet hadde gått i metning, og ga derfor ikke fullstendige måleresultater. For de resterende måleseriene ble dette korrigert.

I følge manualen tilhørende testoppsettet, skal testcellen tåle spenningsverdier opptil 30 kV. Det viste seg likevel at ved dette spenningsnivået var ikke gjennomførbart. Det antas at det

oppsto et overslag over testobjektet, derfor ble forsøket terminert kort tid etter at spenningen ble påsatt. Tykkelsen på testobjektet ble ikke målt, derfor er kun estimert elektrisk feltfordeling angitt i Tabell 3-2 - Terminerte måleserier.

Presenterte figurer for måleserie #2 er noe unøyaktige i forhold til de andre måleserien. Trolig har den akustiske kontakten mellom prøven og sensoren vært dårligere enn for de andre måleseriene, slik at det har påvirket responsen. På grunnlag av dette ble det benyttet en lavere frekvens på lavpassfilteret.

Måleserie #4 ble avsluttet etter 20 dager, grunnet feilvurdering av når måleserien skulle avsluttes. På grunnlag av dette har siste måleverdi benyttet i presenterte resultater valgt til å være etter 20 dager, for enklere sammenligning. Måledata fra 20 dager fremfor 21 dager, viste ingen store forskjeller.

### **4.3.2 Miniatyrkabel**

I det praktiske oppsettet har det vært benyttet et gammelt oscilloskop, med delvis ødelagt skjerm. Derfor ble det ikke oppdaget at signalet gikk i metning ved måleserie #K3 og #K2. Feilen ble ikke oppdaget før tre dager før måleserie #K2 var ferdig. For måleserie #K2 var kalibreringsfilen også berørt, men hovedsakelig ved katode. På grunnlag av dette ble måleserier fra kalibrering på -25 kV benyttet.

Profilene for elektrisk feltfordeling er oppnådd ved signalbehandling i et Matlab-script, hvor profilene oppnås på grunnlag av en integrasjonsprosess over gitte romladningsverdier. De elektriske feltutviklingsprofilene for samtlige måleserier ga ikke et reelt bilde på faktisk utvikling, da feltfordelingen reelt sett ville gått mot null ved anoden. Dette oppsto grunnet signalfrekvensen. Regionen ved anode ble ikke registrert fullstendig av detekterende elektrode, grunnet attenuasjon i miniatyrkabelen. Dette ga en underestimert romladning ved anode i samtlige måleserier.

## 5. Konklusjon

Akkumulasjon av romladning og den medfølgende elektriske feltendringen, er en kompleks prosess som er avhengig av en rekke faktorer. Det er ikke mulig å trekke noen konklusjoner vedrørende mekanismene som er aktive i injeksjons- og akkumulasjonsprosessene. Basert på gjennomførte måleserier for PEX-materialer LE4253 og LS4201S, og diskuterte resultater trekkes følgende konklusjoner.

Romladningsformasjon vil oppstå i både flate testobjekt og miniatyrkabel, og har innvirkning på lokal elektrisk feltfordeling.

Med tiden vil romladning akkumuleres ved elektrodene, regionene med heteroladning gir elektrisk feltforsterkning høyest ved elektrodene.

Basert på måleseriene for flate testobjekt, vil maksimal akkumulert romladning ikke være avhengig av påtrykket elektrisk feltstyrke.



## 6. Forslag til videre arbeid

Utføre måleserie på flat testobjekt med påtrykket 25 kV over enn lengre tidsperiode for å observere hvorvidt romladnings- og elektrisk feltutvikling følger trendene observert ved katoden.

Måleserier på ukondisjonert LE4253, vil til sammenligning av presenterte måleresultater, mulig kunne kartlegge hvorvidt akkumulasjon av romladning i bulk er som følge av ioniserte urenheter eller elektroner.

Flere måleserier på LE4253 med annet elektrodemateriale vil mulig kartlegge ladningsinjeksjonsmekanismer.

LE4253 i kombinasjon med et halvledermateriale, for enklere å kunne sammenligne resultater mellom flat testobjekt og miniatyrkabel.

Utføre databehandling av måleserier for miniatyrkabler, hvor attenuasjon av signalfrekvens korrigeres manuelt, for å gi et reelt bilde av romladningsakkumulasjon ved anode.





## Referanser

1. EWEA, *SEAENERGY 2020 Report*, 2012: [www.ewea.org](http://www.ewea.org).
2. EWEA, *Oceans of Opportunity*. 2009.
3. EWEA, *Thirty years growing together*, in *Annual Report 2011/2012*.
4. Siemens, *High Voltage Direct Current Transmission - Proven Technology for Power Exchange*.
5. Kao, K.C., *Dielectric Phenomena in Solids*. 2004.
6. Kreuger, F.H., *Industrial High DC Voltage*. 1995.
7. Dissado, L.A. and J.C. Fothergill, *Electrical Degradation and Breakdown in Polymers*. 2008.
8. Ildstad, E., *TET 4160 High Voltage Insulating Materials*. 2010.
9. Alijagic-Jonuz, B., *Dielectric Properties and Space Charge Dynamics of Polymeric High Voltage DC Insulating Materials*, 2007, Technische Universiteit Delft.
10. Roseen, P.A., *Electrical Properties of Thermally Aged Polyethylene and of Polyethylene Containing Voltage Stabilisers*, in *Department of Polymer Technology* 1998, Royal Institute of Technology, Sweden.
11. Sanden, B., *XLPE CABLE INSULATION SUBJECTED TO HVDC STRESS*, in *Institutt for Elkraft Teknikk* 1996, NTNU.
12. Ieda, M., *Electrical Conduction and Carrier Traps in Polymeric Materials*. *Electrical Insulation*, IEEE Transactions on, 1984. **EI-19**(3): p. 162-178.
13. Tze, W.C.C., *Space Charge Determination in HVDC Power cable and its Influence on Electric Field*. 2010.
14. Yewen, Z., et al., *Evidence of strong correlation between space-charge buildup and breakdown in cable insulation*. *Dielectrics and Electrical Insulation*, IEEE Transactions on, 1996. **3**(6): p. 778-783.
15. Bodega, R., *Space Charge Accumulation in Polymeric High Voltage DC Cable Systems*. 2006.
16. Chen, G. and J. Zhao. *Space charge and dc dielectric breakdown in polymeric insulation*. in *Plasma Science (ICOPS), 2012 Abstracts IEEE International Conference on*. 2012.
17. Montanari, G.C., *Bringing an insulation to failure: the role of space charge*. *Dielectrics and Electrical Insulation*, IEEE Transactions on, 2011. **18**(2): p. 339-364.
18. Rakowska, A. and K. Hajdrowski. *Influence of high-voltage polarisation on impulse breakdown of polyethylene and crosslinked polyethylene*. in *Conduction and Breakdown in Solid Dielectrics, 1995. ICSD'95., Proceedings of the 1995 IEEE 5th International Conference on*. 1995.
19. Mizutani, T., et al. *Space charge and high field phenomena in polyethylene*. in *Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 1992. Annual Report. Conference on*. 1992.
20. Chung, M.S., et al. *Enhanced field emission and breakdown near the contact between metal and dielectric*. in *Vacuum Nanoelectronics Conference (IVNC), 2011 24th International*. 2011.
21. Fleming, R.J., *Space Charge in Polymers, Particularly Polyethylene*. *Brazilian Journal of Physics*, 1998. **29**(2): p. 280-294.
22. Mauseth, F., et al. *Quality control of extruded HVDC cables: Low frequency endurance testing of model cables with contaminations*. in *High Voltage Engineering and Application (ICHVE), 2010 International Conference on*. 2010.
23. Jiang, G., K. Jinbo, and S. Boggs, *Critical parameters for electrical tree formation in XLPE*. *Power Delivery*, IEEE Transactions on, 1998. **13**(2): p. 292-296.

24. Ogata, S., et al., *Study on the dielectric characteristics of DC XLPE cables*. Power Delivery, IEEE Transactions on, 1990. **5**(3): p. 1239-1247.
25. Khalil, M.S. and A.A. Zaky, *The effect of cable structure on space charge formation*. Electrical Insulation, IEEE Transactions on, 1988. **23**(6): p. 1043-1046.
26. Hallsteinsen, L.M., *Romladningsdistribusjon i PEX HVDC kabelisolasjon - flate prøver og miniatyrkabel*. 2012.
27. Ingebrigtsen, S., *Experience with Techimp PEA System on flat XLPE samples*. 2010.
28. Fu, M., et al. *Space charge measurements in cables using the PEA method:-signal data processing considerations*. in *Solid Dielectrics, 2001. ICSD '01. Proceedings of the 2001 IEEE 7th International Conference on*. 2001.
29. Helland, L., *Romladningsdistribusjon i XLPE HVDC kabelisolasjon for flytende vindturbiner*. 2012.
30. Chen, G., et al., *Electrodes and charge injection in low-density polyethylene using the pulsed electroacoustic technique*. Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on, 2001. **8**(6): p. 867-873.
31. Wintle, H.J., *Charge motion and trapping in insulators: surface and bulk effects*. Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on, 1999. **6**(1): p. 1-10.
32. Kyte, R.H., *Romladningsfordeling i PEX-isolerte HVDC-kabler*. Masteroppgave, NTNU, 2011.
33. Wang, X., et al., *Space charge in XLPE power cable under dc electrical stress and heat treatment*. Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on, 1995. **2**(3): p. 467-474.
34. Choo, W., G. Chen, and S.G. Swingler, *Electric field in polymeric cable due to space charge accumulation under DC and temperature gradient*. Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on, 2011. **18**(2): p. 596-606.

## Vedlegg A

Tabell A - 1

Måletidspunkt for måleserier [minutter]
5
10
15
40
60
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
Målinger utføres deretter en gang hvert døgn, frem til måleserien avsluttes

## Laboratorienotater

I forbindelse med oppsettene benyttet i M2 medfører det manuelt arbeid. Dette avsnittet er en detaljert beskrivelse, slik at fremtidige forsøk kan gjennomføres uten større utfordringer. En kortversjon av denne beskrivelsen under navnet *lab tips og triks* er lagret i mappen *PEA miniatyrkabel og flat*.

Beskrivelsene er punktvis, slik at det skal være enkelt å følge.

- Datamaskinen logger for begge oppsettene.
- På skrivebordet er mappen *PEA miniatyrkabel og flat* snarvei til Labview-programmene som benyttes for begge oppsettene.

## Flate testobjekt

- Plasser en dråpe silikonolje i midten av nedre elektrode, og en dråpe på halvlederen på øvre elektrode.
- Legg testobjektet nederst i målecellen, sett på øvre elektrode og skru til.
- Momentnøkkelen innstilles på ønsket moment, og den vil gi etter når man har skrudd til tilsvarende.
- Målecellen settes så inn i buret. Ledningene som monteres på målecellen er merket med bokstaver.

## Kalibrering

- Åpne Labview-programmet for kalibrering av flat. Husk å huke av *save*. (Målingene vil legges automatisk i mappen *test*).
- Skru på utstyret med knappen *inn*.
- Sett spenningskilden på *High voltage*.
- Matriseboksen skal stå på *close* når spenningsnivået stilles inn ved bruk av *xx*, (ikke direkte på spenningskilden).
- Kalibreres på 2, 3 og 5 kV. 5 målinger per nivå.
- Vent til oscilloskopet stabiliseres mellom målingene på nytt spenningsnivå. Typisk 5 minutter.
  
- Kalibrering utføres med positiv og negativ polaritet på spenningskilden.
- Spenningskilden kobles fra, og dekslet skrues av.
- Se bildet under for enklere beskrivelse.
  
- Spenningskilden kobles til igjen. Svart ledning skal på 1, rød ledning skal på 10.

## Måleserie

- Måleserien startes dagen etter kalibreringen.

- Åpne Labview-programmet for måleserie for flat. Skriv inn tykkelse, spenningsnivå og path.
- Med matriseboksen på *close* stilles ønsket spenningsnivå, før den settes på *open*.
- Når Labview-programmet settes i gang (pilen øverst til venstre), går resten av seg selv.

### Miniatyrkabel

- Silikonfett benyttes mellom miniatyrkabelen og klemmesystemene.
- Monteringen i Faradayburet assisteres av Frank Mausest.

### Kalibrering

- Åpne Labview-programmet for kalibrering av kabel. Husk å huke av *save*. (Målingene vil legges automatisk i mappen *test*).
- Se til at spenningskilden er satt på *manuell* og ikke *remote*, før utstyret skrur på med knappen *inn*.
- Kalibreres på 0, 17,5 og 25 kV, 5 målinger per nivå.
- Vent til oscilloskopet stabiliseres mellom målingene på nytt spenningsnivå. Typisk 5 minutter.
- Kalibrering utføres med positiv og negativ polaritet på spenningskilden.
- Polaritet byttes på baksiden av spenningskildene. Alt flyttes over, unntatt jordingsledningen.

### Måleserie

- Måleserien startes dagen etter kalibreringen.
- Se til at spenningskilden er den med positiv polaritet.
- Innstill ønsket påtrykket spenningsnivå i Labview.
- Sett spenningskilden på *remote*.
- Når programmet i Labview settes i gang, reguleres spenningsnivået automatisk.

## Resultater fra tidligere prosjekt, - og masteroppgaver

I sammenheng med forskningsprosjektet denne masteroppgaven er en del av, har en rekke måleserier blitt gjennomført. Ulike materialer har blitt undersøkt, dette er kun en oppsummering, detaljerte beskrivelser av presenterte resultater er gjengitt i angitte referanser.

I første prosjektoppgave ble det benyttet AC-materialet LS4201S, og gjennomført måleserier på elektrisk feltstyrker mellom 3 og 20 kV/mm. Det ble funnet akkumulasjon av romladning for feltstyrker over 10 kV/mm. For målinger av romladninger ved 20 kV/mm, ble det funnet akkumulasjon av homoladninger i grensesjiktet mellom elektrodene og isolasjonen. Til sammenligning med måleserien gjennomført i denne oppgaven, er trendene ulike. I LE4253 skjer et skifte fra homoladninger til heteroladninger ved katode. Dette skjer ikke i LS4201S, og akkumulasjonen av ladninger er dominerende ved katode, fremfor ved anode i LE4253.

I påfølgende masteroppgave ble det benyttet LS4201S og LE4253. Det ble funnet at romladningsakkumulasjon starter ved 10 kV/mm i LS4201S og etter 12,5 kV/mm i LE4253.

For romladningsakkumulasjonen og den elektriske feltfordelingen gjort i presenterte målinger ved 20 kV/mm viser samsvarende utvikling for målingen presentert i denne oppgaven. Fordi måleseriene er av ulik tidsperspektiv, er det vanskelig å sammenligne total akkumulert romladning, i tillegg var det problemer med scriptet, slik at elektrisk feltfordeling er tvetydig. For elektrisk feltstyrke 25 kV/mm reverseres akkumulasjonen av homoladninger til heteroladninger på katoden etter fire døgn, tilsvarende utvikling er etter observeres først etter 12 dager for 20 kV/mm, men tilsvarende etter fire dager for 30 kV/mm.

Den lokale feltforsterkningen ble funnet til å være maksimalt 10 % i AC-materialet og 5 % i HVDC materialet.

Den mest sannsynlige ledingsmekanismen ble funnet å være ionisk hopping.

For prosjektoppgaven gjennomført høsten 2011, ble materialet LE4201 undersøkt med feltstyrker fra 15 til 15 kV/mm undersøkt, tidsperiodene var opptil 20 dager.

Homoakkumulasjon i grensesjikt mellom elektrode-prøve og heteroakkumulasjon i prøven nært elektrodene. Akkumulasjonen økte med tid og feltstyrke.

Det ble observert et tilsvarende skifte ved katoden, for måleserien som var unntakende ble det foreslått at urenheter i testobjektet og/eller ledningsmekanismer som aktiveres ved felt over 25 kV/mm er årsak. Fullstendig reversering observeres etter fem dager.

I masteroppgave fra 2012 ble materialet LE4201 benyttet, men med halvledermaterialet LE0550 som katode og gull som anoden. elektrisk feltstyrke fra 15 til 25 kV/mm ble benyttet.

Konkluderer med at akkumulasjon av romladning i flate prøver er et resultat av injeksjon av elektroner og hull fra elektrodene og feltassistert ionisering av restproduktene fra kryssbindingen av disse.

Prosjektoppgave 2012: LE4253 gull som elektroder. 2 måleserier, 18,5 kV/mm og 27,8 kV/mm, 16 dager.

Homoladninger i grensesjiktet mellom elektroder og isolasjon. Heteroladninger ble utviklet ved katode og anode. Etter en viss tidsperiode, ble homoladningene i grensesjiktet ved katoden undertrykket og endret til markert akkumulasjon av heteroladninger. Overgangen skjedde raskere ved høyere påtrykket felt. De målte romladningsprofilene besto av romladning injisert fra elektrodene, samt romladning oppstått ved feltassistert ionisering av urenheter.