

Partielle utladninger i kryssbundet polyetylen med forurensninger

Heidi Smisethjell

Master i energi og miljø

Innlevert: juni 2016

Hovedveileder: Frank Mauseth, ELKRAFT

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

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Institutt for elkraftteknikk

Oppgavetekst

Dagens samfunn har et stadig økende energibehov, og er avhengig av en stabil og pålitelig strømforsyning. Høyspentnettet i Norge gjennomgår en oppgradering, samt at det både bygges og planlegges nye overføringskabler til utlandet. Utviklingen mot økende overføringskapasiteter ved høyere spenningsnivå bidrar til økt påkjenning for høyspentlinjer og -kabler.

Kryssbundet polyetylen (PEX, eng. XLPE) er i dag en av de mest brukte isolasjonsmaterialene i elektriske høyspentkabler. Ved å benytte PEX som isolasjonsmateriale oppnås en lettere og mer kompakt kabel, som kan driftes ved en relativt høy temperatur sammenlignet med andre typer høyspentkabler som for eksempel masseimpregnerte kabler.

Renhet i isolasjonen blir ansett som en av de viktigste parameterne, da dette er en faktor som påvirker kabelens kvalitet og levetid. PEX-isolasjon er sensitiv for delutladninger, også kjent som partielle utladninger (PD). Når kabelen spenningssettes blir isolasjonen utsatt for et elektrisk felt. Hvis isolasjonen inneholder uønskede defekter kan disse forurensningene bidra til en lokal feltforsterkning som igjen kan resultere i PD og et eventuelt kabelhavari. Siden PD er ansett for å være en av de viktigste feil- og aldringsmekanismene i PEX-kabler vil det være av interesse å se på hvordan forurensninger påvirker PD-aktivitet i høyspenningisolasjon.

I hovedsak skilles det mellom to typer forurensninger i isolasjonen: organiske og uorganiske. Oksidert polyetylen (PE), som er en organisk forurensning, kan både oppstå under produksjonsprosessen av polyetylen eller under ekstruderingen av selve PEX-kabelen.

Denne oppgaven vil i hovedsak være eksperimentell og gå ut på å foreta måling av partielle utladninger på prøveobjekter av PEX. Plane, sirkulære PEX-objekter skal fremstilles, både referanseobjekter og objekter som inneholder enten organiske eller uorganiske forurensninger. Organiske forurensninger fremstilles ved å oksidere PE, mens stålpartikler vil benyttes som uorganiske forurensninger. PE oksidert i ulike tidsintervall skal undersøkes ved bruk av skanning elektronmikroskop (SEM). Et utvalgt antall prøveobjekter med innlagte forurensninger vil utsettes for mekanisk påkjenning og elektrisk kondisjonering for å undersøke om dette vil føre til endring av PD-aktivitet.

Forord

Denne masteroppgaven har blitt utført ved Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet (NTNU), ved institutt for elkraftteknikk våren 2016. Oppgaven er en videreføring av prosjektoppgaven som ble utarbeidet høsten 2015. Arbeidet er en del av et pågående forskningsprosjekt ved SINTEF Energi og NTNU, som er støttet av Norges forskningsråd.

Jeg ønsker å takke mine veiledere, førsteamanuensis Frank Mausest ved NTNU og seniorforsker Sverre Hvidsten ved SINTEF Energi. De har gitt meg god veiledning og hjelp.

I tillegg vil jeg takke forsker Hans Helmer Sæternes og Jorunn Hølto ved SINTEF Energi. Og til stipendiat Verner Håkonsen som har vært til god hjelp med opplæring av SEM på NanoLab.

Og sist, men ikke minst, takk til medveileder Jostein Bø Fløystad ved SINTEF Energi for god hjelp knyttet til laboratoriearbeid, samt gode og utfyllende svar på alle mine spørsmål.

Trondheim, 9. juni 2016.

A handwritten signature in blue ink that reads "Heidi Smisethjell". The signature is written in a cursive style and is positioned above a horizontal line.

Heidi Smisethjell

Sammendrag

Partielle utladninger (PD) er kjent for å være en av de viktigste feil- og aldringsmekanismene i PEX-kabler. Renhet i isolasjonen blir derfor ansett som en viktig parameter da forurensninger, både organiske og uorganiske, kan bidra til lokale feltforsterkninger og PD-aktivitet. Nylig ble organiske partikler lokalisert i en TR-PEX-kabel i USA ved hjelp av PD-måling.

Hovedfokuset i denne masteroppgaven har vært å PD-teste PEX-objekter på laboratoriet. Plane, sirkulære PEX-disker med en diameter på 100 mm og en nominell tykkelse på 1 mm har blitt fremstilt. Rene referanseobjekter har blitt produsert, samt objekter som inneholdt enten organiske eller uorganiske forurensninger. Organiske partikler har blitt fremstilt ved å oksidere polyetylen (PE) i varmeskap, mens stålpartikler har blitt benyttet som uorganiske forurensninger.

Det har blitt gjennomført målinger av partielle utladninger på prøveobjekter av fem ulike prøveobjektkategorier: referanseobjekter, objekter med stålpartikler, og objekter med PE-partikler oksidert i henholdsvis 7, 22 og 88 døgn. Utladninger har blitt observert, men tenn- og slukkespenning var uavhengig av prøveobjektkategori. Observerte utladninger skyldtes derfor ikke de innlagte forurensningene. Prøveobjekt med stålpartikler har blitt utsatt for mekanisk påkjenning og elektrisk kondisjonering, men viste hverken tegn til forekomst av utladninger ved lavere spenningsnivå eller økt PD-aktivitet. Som nevnt i første avsnitt har det vist seg å være mulig å observere partielle utladninger som skyldes forurensninger i kabelisolasjonen, selv om det ikke har blitt gjort tilsvarende funn i denne rapporten. Partiklene identifisert i TR-PEX-kabelen har vært utsatt for andre påkjenninger sammenlignet med prøveobjektene med kunstige forurensninger benyttet i denne oppgaven.

Undersøkelse av høyspentelektrode i profilometer viste en høydeforskjell på 10 – 21 μm mellom messingelektrode og epoxy, mens høydeforskjellen på jordelektroden var 5 – 10 μm . Siden epoxyen lå forhøyet sammenlignet med messingelektroden har ikke messingelektrodene vært i direkte kontakt med pådampet elektrode på prøveobjektene. Dette har ført til forekomst av PD-aktivitet i grensesjiktet mellom prøveobjektets overflate og messingelektrodene innstøpt i epoxy. Dagens laboratorieoppsett bør derfor endres.

PE-partikler oksidert i 7 og 88 døgn har blitt studert ved bruk av skanning elektronmikroskop (SEM). Resultatene fra undersøkelsen antyder at heft mellom omliggende PEX-isolasjon og PE-partiklene avhenger av oksidasjonsgrad. Porøse områder og hulrom i overgang fra partikkel til isolasjon har blitt identifisert i partiklene oksidert i 88 døgn, hvor maksimal diameter på hulrom var 10 μm . Tilsvarende funn ble ikke gjort i partiklene som hadde oksidert i 7 døgn. Resultatene antydde òg at partiklene oksidert i 7 døgn heftet bedre til omliggende PEX-isolasjon sammenlignet med partiklene oksidert i 88 døgn.

Abstract

Partial discharges (PD) are considered as one of the most important failure and ageing mechanisms in XLPE cables. Cleanliness is therefore deemed as one of the most crucial factors due to the fact that impurities, both organic and inorganic, can lead to local field enhancement. Recently, organic particles were located in a TR-XLPE cable in the US by using the results from a PD test performed on the cable.

The main focus of this thesis has been to conduct PD measurements on test objects of XLPE in the laboratory. Plane, circular test disks of XLPE with a diameter of 100 mm and a nominal thickness of 1 mm have been produced. Both clean reference objects and objects with either organic or inorganic contaminants have been made. Organic particles have been prepared by oxidizing polyethylene (PE) in a heating cabinet, while particles of steel have been utilized as inorganic contaminants.

PD measurements have been performed on five different categories of test objects: reference objects, objects with steel particles and objects with PE particles oxidized for 7, 22 and 88 days. Partial discharges have been observed, but neither the inception voltage nor the extinction voltage depends on type of test object. PD activity due to the contaminants has not been observed. Test objects containing particles of steel have been subjected to mechanical and electrical stress, but did not show any signs of either increased PD activity or decreased inception voltage. As mentioned earlier it has been proved possible to observe partial discharges caused by contaminants in cable insulation. Similar findings have not been done in this report. The particles localized in the TR-XLPE cable has been subjected to other stresses compared to the test objects with artificial contaminants used in this report.

By investigating the high voltage electrode using the profilometer a height difference of 10 – 21 μm between the brass electrode and the epoxy was found, while the height difference of the grounding electrode was 5 – 10 μm . Due to the fact that the epoxy was laying higher than the brass electrode, the brass electrode was not completely in contact with the aluminium electrode on the test object. This led to PD activity in the interface between the test objects surface and the brass electrodes casted in epoxy. Change of current laboratory setup is therefore necessary.

PE particles having oxidized for 7 and 88 days have been investigated in the scanning electron microscope (SEM). The results showed that the adhesion between the PE particles and the surrounding XLPE depended on the degree of oxidation. Porous regions and cavities in the PE particles having oxidized for 88 days were observed. Maximum size of the cavities was 10 μm . Similar observations were not found in particles that had oxidized for 7 days. The results also showed that the particles having oxidized for 7 days had a better adhesion compared to the particles having oxidizing for 88 days.

Innhold

1	Introduksjon	1
2	Materialegenskaper og feilmekanismer i kryssbundet polyetylen	4
2.1	Polymer som isolasjonsmateriale	4
2.1.1	Polyetylen	4
2.1.2	Kryssbundet polyetylen	5
2.2	Degradering av polymerisolasjon	6
2.2.1	Fysisk degrading	6
2.2.2	Kjemisk degrading	6
2.2.3	Elektrisk degrading	6
2.3	Partielle utladninger	7
2.3.1	Hulromsutladninger	8
2.3.2	Elektrisk måling av partielle utladninger	9
2.3.3	Tenn- og slukkespenning	10
2.4	Oksiderte partikler i polymerisolasjon	11
2.4.1	Oksidasjon	11
3	Eksperimentelt arbeid	13
3.1	Fremstilling av organiske forurensninger	13
3.1.1	Produksjon av PE-disker	13
3.1.2	Oksidering	14
3.2	Fremstilling av prøveobjekter	15
3.2.1	Støping	16
3.2.2	Kondisjonering	17
3.2.3	Plassering av partikler	17
3.2.4	Påføring av elektrode	18
3.3	Skanning elektronmikroskop	19
3.3.1	Prøvepreparering	19
3.4	Måleoppsett	20

INNHOOLD

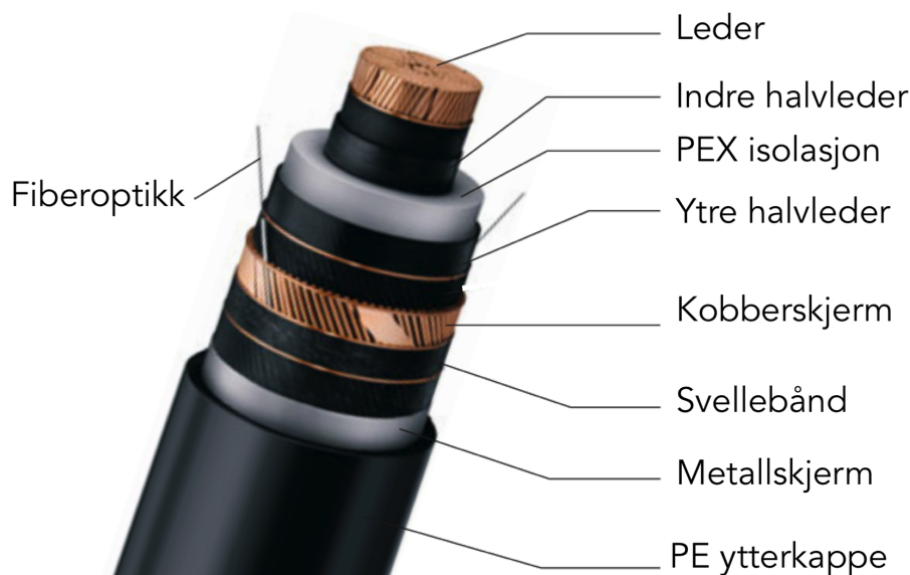
3.4.1	Arrangement i trykktank	21
3.4.2	Montering av komponenter i trykktank	23
3.5	Måling av partielle utladninger	24
3.5.1	Mekanisk påkjenning og elektrisk kondisjonering	27
4	Resultater og diskusjon	29
4.1	Måling av partielle utladninger	29
4.1.1	Påvirkning av degraderte aluminiumselektroder	29
4.1.2	Resultater fra PD-måling utført på fem ulike prøveobjektkategorier	31
4.1.3	Forskjell mellom laboratorieforsøk og idriftsatt kabel	36
4.1.4	PD-måling av prøveobjekter utsatt for mekanisk påkjenning og elektrisk kondisjonering	37
4.2	Oksidering av polyetylen	39
4.2.1	Skanning elektronmikroskop	39
5	Konklusjon	43
6	Videre arbeid	44
A	Vedlegg A - Utstysrliste	i
B	Vedlegg B - Elektroder undersøkt i profilometer	ii
B.1	Høyspentelektrode	ii
B.2	Jordelektrode	iii

1 Introduksjon

Det oppleves i dag en økende etterspørsel av elektrisk kraft. Samtidig er samfunnet avhengig av en pålitelig og stabil kraftforsyning, hvor strømavbrudd har konsekvenser både for nettselskap og kunder. Det vil derfor være fordelaktig å kunne detektere potensielle feil som kan føre til uforutsette utkoblinger på et tidlig stadium.

I den nasjonale sårbarhets- og beredskapsrapporten fra 2012 vurderer DSB, Direktoratet for Samfunnssikkerhet og Beredskap, samfunnets sårbarhet og beredskap ved eventuell bortfall av elektrisk kraft. Denne rapporten slår fast at «En rekke samfunnsfunksjoner og infrastrukturer avhenger av elektrisk kraft for å fungere»[1, side 5], og hvor det videre konkluderes med at «(...) kommunene vil få store problemer ved et langvarig bortfall av elektrisk kraft i en kuldeperiode(...)»[1, side 113]. Dette understreker viktigheten av et pålitelig kraftnett.

Kryssbundet polyetylen (PEX) er i dag en av de vanligste isolasjonsmaterialene i elektriske høyspentkabler. PEX er en form for polyetylen (PE), hvor polymermolekylene er kryssbundet. Ved å benytte polymer som isolasjonsmateriale oppnås en lett og kompakt kabel, med en langt enklere skjøteprosess sammenlignet med kabler som benytter andre isolasjonsmaterialer. Polymermaterialets høye elektriske holdfasthet og små dielektriske tap[2] er også egenskaper som er fordelaktige. Se figur 1.1 for en illustrasjon av en typisk PEX-kabel.



Figur 1.1: Typisk oppbygging av en PEX-kabel. Isolasjonen har til hensikt å skille to potensialer fra hverandre, og fungerer som en barriere mellom høyspentpotensialet som oppstår i lederen og jordpotensialet som befinner seg i ytre halvleder. Merk at oppbygningen av PEX-kabler kan være veldig forskjellige og inneholde ulike type lag hvor hvert lag har hver sin funksjon. Bildet er hentet fra referanse [3, side 6].

I polymerisolasjon blir renhet ansett som en av de viktigste parameterne[4], da det ønskes driftssikre kabler med lang levetid. Når høyspentkabler spenningssettes utsettes isolasjonen for et høyt elektrisk felt, gjerne fra 10 – 15 kV/mm. Hvis isolasjonen inneholder defekter, som for eksempel hulrom eller ulike typer forurensninger, vil det oppstå lokale feltforsterkninger i isolasjonen. Disse områdene vil være spesielt utsatt for partielle utladninger (PD), som er kjent for å være en av de viktigste feil- og aldringsmekanismene i et polymerisolasjonssystem[5].

I hovedsak skilles det mellom to typer forurensninger i isolasjonen: organiske og uorganiske. Typiske eksempler på uorganiske forurensninger er metallpartikler som for eksempel aluminium, jern og kobber. Polymerisolasjon som inneholder denne type partikler har vært forsket endel på, se referanser [6], [7], [8] og [9]. Her konkluderes det blant annet med at forekomst av uorganiske forurensninger bidrar til en reduksjon av kabelens holdfasthet. Derimot er det gjort langt færre studier som viser hvordan forekomst av organiske partikler påvirker kabelens kvalitet.

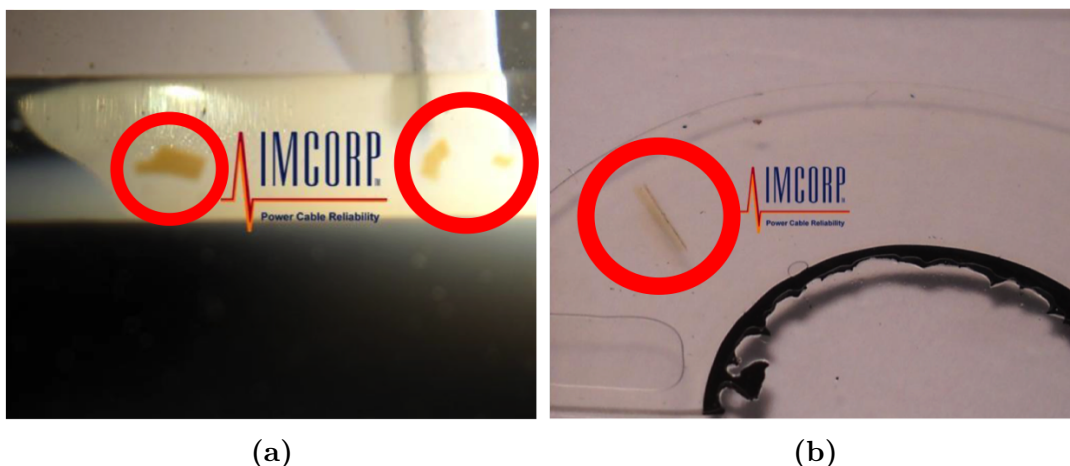
I PEX-isolasjon kan det forekomme partikler av oksidert PE, som er en organisk forurensning. Disse partiklene kan både oppstå under produksjonsprosessen av PE eller ved ekstruderingen av PEX-kabelen. Oksidering av PEX ved 200°C har vist å bidra til en økning av materialets dielektriske tap[10], og porøse områder har blitt observert i PE oksidert i 14 døgn ved 170°C[4]. Disse porøse områdene vil kunne fungere som mikrohulrom og dermed være utsatt for PD-aktivitet. Samtidig vil partiklene kunne hefte seg dårlig til isolasjonsmaterialet som kan føre til forekomst av hulrom mellom partikkel og omliggende isolasjon. I tillegg kan partiklene ha skarpe kanter som bidrar til lokal feltforsterkning.

Forurensninger i isolasjonsmateriale kan være vanskelig å detektere. Da er det enda viktigere å kartlegge hvordan forurensningene påvirker en idriftsatt kabel, med tanke på partielle utladninger. I fabrikk testes alle nye kabler med hensyn på PD, hvor øvre akseptable utladningsgrense er satt til 10 pC[11].

Nylig ble en 35 kV TR-PEX¹-kabel i USA PD-testet. Kabelen var produsert i 2010 og var i drift fra 2010 – 2015. Ved hjelp av PD-testing ble organiske partikler lokalisert i isolasjonen[12], se figur 1.2.

Det har altså vist seg å være mulig å finne organiske forurensninger i en idriftsatt kabel ved hjelp av PD-testing. Det er ønskelig å kunne studere tilsvarende forurensninger under kontrollerte forhold på laboratoriet, for å kunne få en bredere forståelse av hvordan organiske partikler påvirker isolasjonens egenskaper.

¹TR-PEX, eng. TR-XLPE = Tree-Retardant Crosslinked Polyethylene. Kabler med vanntrehekkende PEX-isolasjon. Merk at videre henvisning til vanntrehekkende PEX-kabler forkortes med TR-PEX, da det i dag ikke eksisterer en etablert norsk forkortelse for dette isolasjonsmaterialet.



Figur 1.2: Organiske partikler lokalisert i en 35 kV TR-PEX-kabel ved hjelp av PD-testing. Bildene er hentet fra referanse [12].

I denne oppgaven har prøveobjekter av PEX, både med og uten forurensninger, blitt PD-testet. Masteroppgaven bygger videre på arbeid utført i en prosjektoppgave høsten 2015[13], hvor det ble utviklet et eksperimentelt oppsett for måling av partielle utladninger på plane, sirkulære PEX-disker. Til dags dato har ingen tilsvarende forsøk blitt gjennomført, hvor PD-målinger er utført på polymerobjekter med denne type geometri. Produksjonsprosessen av benyttet testobjekt er enklere og tidsbesparende sammenlignet med for eksempel produksjon av koppobjekter med semi-Rogowskiprofil eller miniatyrkabler. I tillegg oppnås en god kontroll på de innlagte forurensningene, da man selv bestemmer hvor disse skal plasseres i testobjektet, samt at partiklene enkelt kan studeres før PD-måling. Å benytte denne type geometri forenkler også etteranalysen betraktelig, hvor partiklene lett kan detekteres og studeres. Oksiderte PE-partikler har blitt undersøkt i skanning elektronmikroskop (eng. scanning electron microscopy, med forkortelse SEM), for å studere hvordan partiklene hefter til omliggende PEX-material og om partiklene får porøse områder som følge av oksideringen.

Det er antatt at leseren har en viss basiskunnskap innenfor elkraft. Alle spenninger oppgis som RMS-spenning² om ikke annet er presisert.

²RMS = Root Mean Square. RMS-verdien til en sinusbølge: $V_{\text{RMS}} = V_{\text{Amplitude}}/\sqrt{2}$.

2 Materialeegenskaper og feilmekanismer i kryssbundet polyetylen

Et dielektrisk materiale er et isolerende materiale som ikke transporterer elektroner eller ioner. I virkeligheten vil isolasjonen polariseres ved påføring av et elektrisk felt. Primært skal et dielektrisk materiale isolere ulike potensial fra hverandre, for å unngå flyt av elektrisk ladning. Både luft, vakuum, SF₆, væske og fast materiale kan fungere som isolator. I denne oppgaven er fokuset på kryssbundet polyetylen som dielektrisk materiale.

2.1 Polymer som isolasjonsmateriale

Polymer egner seg godt som elektrisk isolasjonsmateriale, da polymermateriale har lav elektrisk ledningsevne σ og høy elektrisk holdfasthet. I tillegg har polymerer lav vekt og er mekanisk sterkt[2].

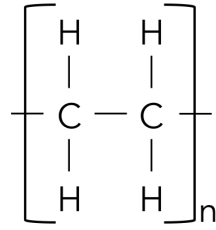
Polymerer fremstilles ved polymerisasjon. Polymerisasjon, eller polymerisering, er en kjemisk reaksjon hvor molekyler reagerer ved å binde seg sammen til større molekyler.

Det skilles mellom termoplast og herdeplast[14] (eng. thermoplastics og thermosetting). Termoplastisk polymer inneholder ingen kryssbindinger, og kan derfor formes på nytt ved oppvarming, og beholder ønsket form ved endt avkjøling. Eksempel på termoplast er polyetylen (PE), polyvinylklorid (PVC) og polypropylen (PP). Herdeplast smelter når det utsettes for høy nok temperatur og trykk. Når herdeplasten først er kryssbundet, kan den ikke smelte, kun mykne. Formen kan altså ikke endres når materialet først er kryssbundet. Eksempler på herdeplast er epoxy (EP) og kryssbundet polyetylen (PEX).

2.1.1 Polyetylen

PE er et termoplastisk materiale med repeterende struktur, se figur 2.1. Polyetylen fremstilles ved polymerisasjon av gassen etylen, også kjent som eten, C₂H₄.

Jo lengre molekylkjeden er, jo høyere er smeltetemperaturen. Siden polyetylen ikke inneholder polare grupper har materialet en lav relativ permittivitet, $\epsilon_r = 2,3$ ved 20°C. Også de dielektriske tapene $\tan \delta$ er lave. Høyeste tillatte driftstemperatur for kabler med PE-isolasjon er mellom 65 – 70°C[2].



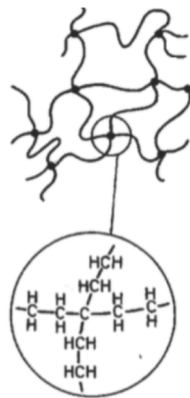
Figur 2.1: Skjematisk fremstilling av molekylstrukturen til polyetylen.

2.1.2 Kryssbundet polyetylen

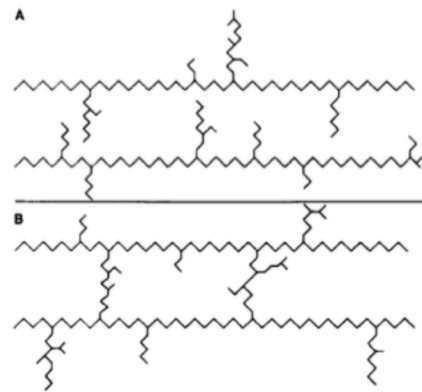
Ved å utsette PE for en vulkaniseringsprosess kryssbindes polyetylenmolekylene, illustrert i figur 2.2 og 2.3. Denne prosessen hever smeltepunktet og fører dermed til at PEX tåler høyere temperaturer sammenlignet med PE. Siden PEX er herdeplast, vil det ikke kunne smelte, kun mykne. PEX har lik relativ permittivitet som PE, $\epsilon_r = 2,3$ ved 20°C , og høyspentkabler med PEX-isolasjon har en tillatt driftstemperatur på 90°C [2].

Kryssbinding kan skje på ulike måter, for eksempel ved å tilsette peroksider eller silanegrupper, eller ved bestråling av høyenergi elektronstråle[15]. Kjemisk kryssbinding med peroksider er den mest brukte metoden, og skjer ved å tilsette organisk peroksid i PE før ekstruderingen.

Etter endt kryssbinding vil det ligge igjen restprodukter i materialet. Eksempler på restprodukter er vann, metan og acetofenon. Disse biproduktene er uønsket da de påvirker isolasjonsmaterialet[16]. For å bli kvitt restproduktene må PEX kondisjoneres. Denne prosessen er også kjent som avgassing.



Figur 2.2: Kryssbundet polyetylen. Figur hentet fra referanse [17, *Chapter 2 – Cable Materials, section 2.8*].



Figur 2.3: Figur **A:** PE med forgreninger. Figur **B:** Kryssbundet PE, PEX. Figur hentet fra referanse [14, side 15].

2.2 Degradering av polymerisasjon

Polymerisasjon i drift vil etterhvert oppleve en aldring på grunn av ulike typer degraderingsmekanismer. Fysisk, kjemisk og elektrisk degradering forklares nærmere da disse er sentrale for videre lesing av oppgaven.

Når polymerisasjonen påtrykkes et elektrisk felt vil isolasjonen utsettes for en elektrisk degradering[18]. I tillegg settes den for en fysisk og kjemisk degradering. Disse to degraderingsprosessene er ikke avhengig av et elektrisk felt og kategoriseres derfor som *low level degradation*[19]. Fysisk og kjemisk degradering er sentrale, ikke bare fordi de vil kunne bidra til en svekkelse av polymerisasjonen over tid, men også fordi de påvirker den elektriske degraderingen.

2.2.1 Fysisk degradering

Fysisk degradering oppstår ved påføring av mekaniske krefter og påkjenninger, som igjen kan skape mikrohulrom og sprekker i polymerisasjonen. Polymerer er mer følsomme for temperaturendringer enn for eksempel metaller. Temperaturvariasjoner bidrar til bevegelser i polymerbindingene[20] og bevegelsene kan føre til en endring av de mekaniske spenningene mellom polymerkjedene, noe som bidrar til en fysisk svekkelse av materialet.

Polymerisasjon benyttet i høyspentkabler vil utsettes for sterk mekanisk påkjenning både under produksjon og installasjon. Før idriftsettelse vil det derfor være sannsynlig å anta at PEX-isolasjonen har små sprekker og mikrohulrom[21]. Polymerer er et mykt materiale, og når isolasjonen utsettes for mekaniske strekkrefter vil hulrommene og sprekkenes utvides. Det er også vist at ved å mekanisk belaste PEX reduseres holdfastheten betydelig[21].

2.2.2 Kjemisk degradering

Kjemisk degradering vil oppstå ved høy temperatur i isolasjonen. Både kutting av polymerkjeder og oksidasjon er eksempel på denne typen degradering[22]. Kjede-kutting er kjent for å skape mikrohulrom i materialet[23]. Oksidasjon av polymerer er en av de vanligste årsakene til nedbryting av polymermaterialer[24], og forklares derfor nærmere i avsnitt 2.4.

2.2.3 Elektrisk degradering

Når polymerisasjonen spenningssettes vil elektrisk degradering forekomme, og både den fysiske og kjemiske degraderingsprosessen vil akselerere ved et påtrykt elektrisk felt[22][19]. Eksempler på elektrisk degradering er PD-aktivitet og elektrisk trevekst. Partielle utladninger beskrives nærmere i avsnitt 2.3. Merk at kjemisk, fysisk og

elektrisk degradering ofte påvirker hverandre, for eksempel ved at PD-aktivitet kan oppstå i mikrohulrom og -sprekker som igjen kan være et resultat av kjemisk og fysisk degradering.

2.3 Partielle utladninger

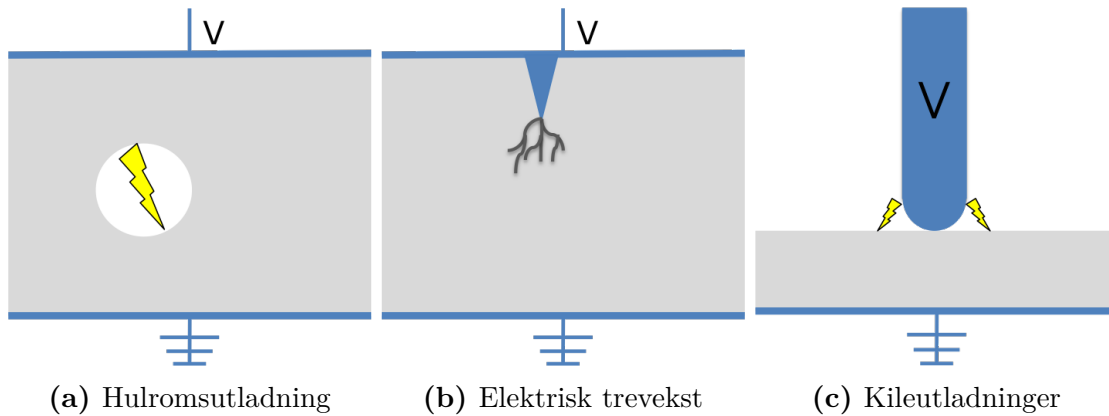
Partielle utladninger (eng. partial discharges, med forkortelse PD) er lokale elektriske utladninger som kun delvis går over isolasjonen mellom to elektroder[25]. Dette kan, men trenger ikke skje i nærheten av en av elektrodene. PD kan både oppstå i fast, flytende eller gassholdig isolasjon[2], og forekommer når det lokale elektriske feltet overskrider materialets holdfasthet. Partielle utladninger måles i coulomb, C, og er som regel av størrelsesorden pC. Varigheten på en PD-puls er mindre enn 1 μ s[26].

To kriterier må være oppfylt for at partiell utladninger skal kunne forekomme. Det må være et fritt elektron til stede, samt et sterkt nok elektrisk felt til å starte et lokalt elektronskred. Ved en partiell utladning vil det elektriske feltet rundt utladningen delvis kollapse og energi fra feltet blir frigjort. Denne energien kan frigjøres som blant annet akustiske bølger, lys, elektromagnetisk stråling eller i form av strømpulser[27]. PD kan også føre til lokal oppvarming av isolasjonen som igjen vil bidra til en kjemisk degradering av isolasjonen. Ved gjentagende PD-aktivitet kan størrelsen på det opprinnelige hulrommet øke. PD kan etterhvert ende med gjennomslag i isolasjonsmaterialet, hvor det etableres en ledende kanal fra høyspenningspotensiale til jord. Partielle utladninger vil altså føre til en degradering av omliggende materiale, og er en kjent aldringsmekanisme for isolasjonsmaterialer[26]. Kabelprodusentene tester nye PEX-kabler for PD. I henhold til NEK IEC³ 62067 er den øvre akseptable utladningsgrensen satt til 10 pC[11]. Denne grensen er satt fordi det er vanskelig å måle utladninger under 10 pC på grunn av støy, ikke fordi utladninger under dette nivået ikke har en innvirkning på isolasjonsmaterialet.

PD kan blant annet opptre i form av korona-, hulroms-, overlade- og kileutladninger. Kun hulromsutladninger vil bli nærmere forklart, da dette er mest relevant i denne oppgaven. Ønskes nærmere beskrivelse av ulike typer PD henvises det til litteratur[5]. Figur 2.4 viser eksempler på typiske geometrier hvor PD kan oppstå.

Store partielle utladninger kan både være hørbare og synlige, mens små utladninger som typisk oppstår i isolasjonsmedie ikke kan oppfattes direkte av menneskelige sanser[2]. PD kan detekteres både ved elektriske, kjemiske og akustiske metoder[5]. Elektrisk måling er vanligst, og blir beskrevet i avsnitt 2.3.2.

³NEK = Norsk Elektroteknisk Komite. IEC = International Electrotechnical Commission.



Figur 2.4: Figur a illustrerer forekomst av PD i hulrom i isolasjonsmaterialet. Figur b viser elektrisk trevekst, som kan oppstå fra spisse kanter med høyere potensial sammenlignet med omliggende materiale. Figur c illustrerer kileutladning som kan oppstå mellom høyspentpotensial og fast isolasjon, med gass eller olje i rundt.

2.3.1 Hulromsutladninger

Hulromsutladninger oppstår i hulrom i isolasjonen, som er fylt med enten gass eller væske.

Dersom hulrommet er rektangulært og står vinkelrett på det elektriske feltet, blir feltforsterkningen inne i hulrommet[2]:

$$\frac{E_{\text{hulrom}}}{E_{\text{isolasjon}}} = \frac{\epsilon_{r, \text{isolasjon}}}{\epsilon_{r, \text{hulrom}}}. \quad (1)$$

I likning (1) antas det at bredden til hulrommet er betydelig større enn høyden, slik at hele det elektriske feltet står utelukkende normalt på elektrodene.

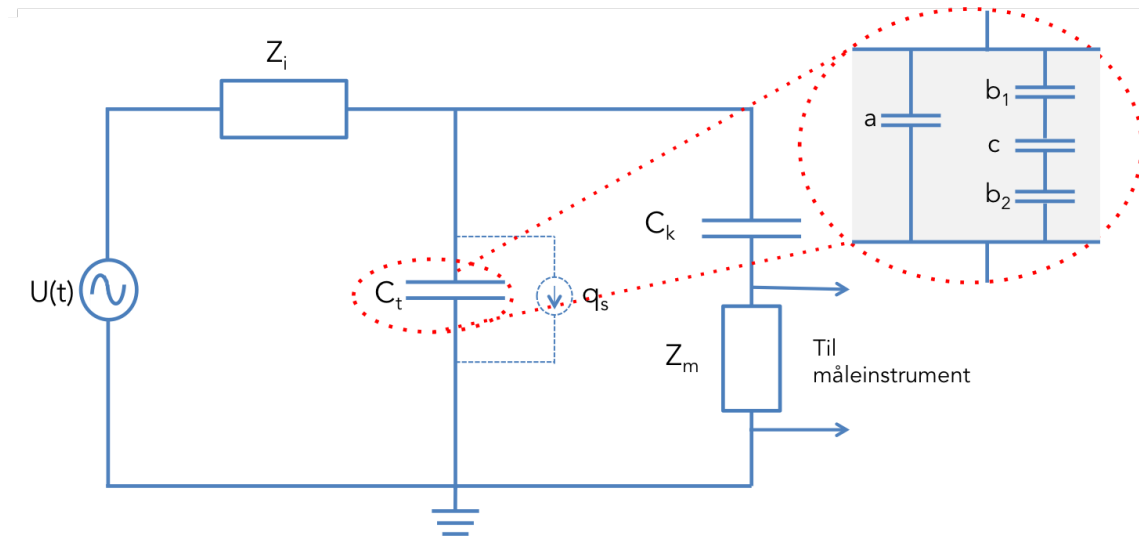
I et sirkulært hulrom kan det maksimale elektriske feltet uttrykkes[2]:

$$\frac{E_{\text{hulrom}}}{E_{\text{isolasjon}}} = \frac{3 \cdot \epsilon_{r, \text{isolasjon}}}{\epsilon_{r, \text{hulrom}} + 2 \cdot \epsilon_{r, \text{isolasjon}}}. \quad (2)$$

Som regel vil hulrommet være fylt med gass. Gass har en lavere permittivitet sammenlignet med omliggende isolasjonsmateriale som for eksempel PEX, altså vil $\epsilon_{r, \text{isolasjon}} > \epsilon_{r, \text{hulrom}}$. Ved å benytte likning (1) og (2), for henholdsvis firkantet og sirkulært hulrom, sees det at hulrommet vil bli utsatt for et sterkere elektrisk felt sammenlignet med resten av isolasjonen. Når feltstyrken overgår holdfastheten til materialet, vil utladninger opptre. Merk at holdfastheten til gass i et homogent elektrisk felt varierer i følge Paschenkurven[2], og avhenger av gasstrykket og avstanden mellom elektrodene ved en gitt temperatur.

2.3.2 Elektrisk måling av partielle utladninger

Ved å se på energiutvekslingen som skjer ved partielle utladninger, kan intensiteten på utladningene måles. Figur 2.5 viser målekrets som kan benyttes ved elektrisk måling av PD[2].



Figur 2.5: Målekrets benyttet ved elektrisk deteksjon av PD. Testobjektets abc-ekvivalent er vist til høyre. Se teksten for nærmere beskrivelse av de ulike komponentene.

Kretsen påtrykkes en AC-spenning $U(t)$ som vil sette opp et elektrisk felt i prøveobjektet C_t . Z_i er kildens interne impedans og kan betraktes som induktiv. Ved høye frekvenser vil denne induktive impedansen bli såpass stor og kan derfor sees bort i fra. q_s er ladinginjektoren, og benyttes kun ved kalibrering av målkretsen. C_k representerer koblingskondensatoren, hvor kapasitansen C_k er større enn testobjektets kapasitans C_t , ofte ti ganger så stor. Dette for at C_k skal kunne utligne spenningsfallet som oppstår i C_t ved en utladning. Måleimpedansen Z_m er koblet til måleinstrument for å detektere PD.

Prøveobjektet C_t kan representeres med en såkalt abc-ekvivalent. Her er c kapasitansen til hulrommet, b_1 og b_2 er kapasitansen i tverrsnittet over og under hulrommet. a er kapasitansen i resten av testobjektet. Videre kan b_1 og b_2 slås sammen til en felles kapasitans $b = \frac{b_1 \cdot b_2}{b_1 + b_2}$, hvor $b < c \ll a$.

Når spenningen over hulrommet U_c overskrider holdfastheten vil det forekomme et lite gjennomslag i hulrommet, altså en partiel utladning. Denne ladningen kan ikke måles direkte, men det kan observeres et spenningsfall over testobjektet, ΔU_t . For å kompensere for dette spenningsfallet vil koblingskondensatoren overføre en ladning fra C_k til C_t . Denne ladningen blir kalt *tilsynelatende ladning*, q_a . Merk at q_a ikke er lik den utladningen som blir frigjort i hulrommet.

Impedansen Z_m vil måle den transiente strømmen Δi som sendes fra C_k til C_t . Likning (3) viser forholdet mellom detektert strøm og tilsynelatende ladning. Merk at a representerer kapasitansen til hele testobjektet, da det ble antatt at $b < c \ll a$.

$$q_a = \int \Delta i \cdot dt = \Delta U_t \cdot a. \quad (3)$$

Det er altså ikke den virkelige utladningen som måles, men den utladningen som må til for å utjevne spenningsfallet over testobjektet som kom på grunn av en partiell utladning. Den tilsynelatende ladningen q_a vil være proporsjonal med den energien som frigis hulrommet ved en partiell utladning.

Målekretsen kalibreres ved å tilføre testobjektet en kjent ladning, q_s . Responsen måles, og man får da en kjent kalibreringsfaktor k . Denne kalibreringsfaktoren brukes videre for å finne tilsynelatende ladning q_a [5]:

$$q_a = k \cdot U_m, \quad (4)$$

hvor U_m er målt spenning over måleimpedans Z_m .

Måling av partielle utladninger kan gi en indikasjon på størrelsen til utladningene og hvor på fasen de inntreffer. Typisk for PD-utladninger i hulrom er at de ligger på spenningsens stigende flanke[5].

2.3.3 Tenn- og slukkespenning

Spenningsnivået når PD forekommer kalles *tennspenningen* (eng. inception voltage, med forkortelse *PDIV*). Denne spenningen finnes ved å gradvis øke spenningen over testobjektet til PD opptrer. Ved å gradvis senke spenningen kan *slukkespenningen* (eng. extinction voltage, med forkortelse *PDEV*) til utladningene identifiseres. Slukkespenningen er altså det spenningsnivået hvor utladningene slutter å opphøre. Tennspenningen *PDIV* er høyere enn slukkespenningen *PDEV*[5].

2.4 Oksiderte partikler i polymerisolasjon

Polymerisolasjon er sårbar for partielle utladninger, og man vil derfor unngå uønskede partikler i isolasjonen. Forurensninger i isolasjonsmaterialet kan deles i to kategorier: organiske forurensninger og uorganiske forurensninger, hvor oksiderte PE-partikler er et eksempel på en organisk forurensning.

Defekter i isolasjonsmaterialet vil kunne bidra til en reduksjon av holdfastheten. Forurensninger, både de organiske og uorganiske, vil kunne hefte seg dårlig til isolasjonsmaterialet som kan føre til forekomst av hulrom mellom partikkel og omliggende isolasjonen. Det kan òg oppstå hulrom inne i selve partikkelen, samt at partikkelen kan ha en annen permittivitet som bidrar til lokal feltforsterkning.

Metallpartikler er typisk eksempel på uorganiske forurensninger. Polymerisolasjon med uorganiske forurensninger har vært forsket endel på, og i studiene konkluderes det med at forekomst av uorganiske partikler bidrar til en redusert holdfasthet[10][8]. Både størrelsen og formen på partikkelen påvirker grad av lokal feltforsterkning[10]. Økning i antall forurensninger vil også bidra til en videre reduksjon av kabelens holdfasthet[6].

Forekomst av oksiderte polymerpartikler er blant annet påvist som en kilde til elektrisk trevekst, hvor en høyere konsentrasjon av forurensninger vil bidra til en tidligere og raskere trevekst i isolasjonsmaterialet[22]. Oksidert polyetylen kan oppstå under produksjonsprosessen av PE, hvor PE kan stagnerer i soner med høy temperatur. PE blir videre brukt til fremstilling av PEX, og det vil her være vanskelig å skille ut eventuelle oksiderte partikler. Organiske forurensninger kan også oppstå under ekstruderingen av selve PEX-kabelen.

2.4.1 Oksidasjon

Oksidasjon er en kjemisk reaksjon hvor stoffets oksidasjonstall øker. Ved høy temperatur og/eller tilgang på UV-lys vil oksidasjonen akselereres. En oksidasjonsprosess av isolasjon kan også kalles en aldriingsprosess, da økt oksidasjonsgrad bidrar til degradering av isolasjonsmaterialet. Autooksidasjon er oksidasjon som foregår ved temperaturer fra omgivelsestemperatur opp til omtrent 200°C[28]. For å forsinke oksidasjonsprosessen er det vanlig å tilsette antioksidanter i polymerisolasjon[29]. Antioksidantene fungerer som offermateriale, og først når antioksidantene er brukt opp vil oksidasjon av selve polymermateriale forekomme. Når PE-partikler oksideres vil fargen endre seg fra å være transparent, til lys brun og etterhvert bli svart. Denne fargeendringen er et resultat av biproduktene som frigis etterhvert antioksidantene brytes ned.

Når polymerpartikler oksideres vil de bli mekanisk svekket. Dette fordi oksidasjon vil forårsake en viss sprøhet i materialet som vil redusere molekylvekten og dermed bidra til å skape porøse områder[20]. Disse porøse områdene vil kunne fungere som små mikrohulrom hvor PD kan oppstå.

Følgende som presenteres er hentet fra referanse [28, side 187], og er ment for å forklare hvordan oksidasjon av polymermaterialer foregår. Energi fra stråling, lys og varme vil fungere som en initiator og danne en fri radikal⁴ $R\cdot$ i polymermateriale. RH representerer polymermaterialet:



Merk at hydrogenatomet som ikke inngår i R ikke trenger å sitte på enden av kjeden, slik det er fremstilt i likning (5).

En fri radikal $R\cdot$ vil initiere oksideringsprosessen av hydrokarboner:



Videre kan $R\cdot$ reagere med oksygen, som fører til dannelse av en ny radikal $ROO\cdot$:



Som vist i likning (8), reagerer $ROO\cdot$ med polymermolekyler, og igjen danner en ny radikal:



Reaksjon (7) og (8) kan foregå flere hundre ganger før den avsluttes. Reaksjonene avsluttes ved at to radikaler reagerer og det dannes et ikke-reaktivt produkt, via én av disse reaksjonene:



Ved å oksidere polyetylen ved høy temperatur, initiator, og god tilgang på oksygen akselereres aldringsprosessen, da hastigheten til oksideringen øker med temperatur og mengde tilført oksygen. På denne måten kan det på relativt kort tid fremstilles kunstig organiske forurensninger i laboratoriet.

⁴En fri radikal er et atom eller molekyl som har uparede valenselektroner, noe som gjør de svært reaktive.

3 Eksperimentelt arbeid

Dette kapittelet inneholder grundig beskrivelse av:

- Fremstilling av organiske forurensninger.
- Hvordan prøveobjektene ble produsert.
- Prøvepreparering og bruk av skanning elektronmikroskop.
- Måleoppsett.
- Prosedyre for måling av partielle utladninger.
- Prosedyre for påføring av mekanisk påkjenning og elektrisk kondisjonering.

3.1 Fremstilling av organiske forurensninger

Kunstig organiske forurensninger ble fremstilt ved å oksidere sirkulære disker av polyetylen. Disse forurensningene var ment å simulere reelle forurensninger som kan forekomme i PEX-isolasjon. Organiske forurensninger som stammer fra PE-granulater direkte fra materialleverandør kan ha oksidert over lenger tid, mens forurensninger som oppstår i selve ekstruderprosessen vil sannsynligvis ha oksidert i et kortere tidsintervall. Partikler ble derfor oksidert i både korte og lange tidsintervall for å forestille de reelle forurensningene som kan oppstå i kabelisolasjon.

3.1.1 Produksjon av PE-disker

Plastmaterialet LE4147 fra Borealis ble brukt til å produsere PE-disker. PE-diskene hadde en sirkulær form, med en diameter på 100 mm og tykkelse på 0,25 mm. Shims med tykkelse på 1,75 mm ble benyttet for å støpe objekter med ønsket tykkelse. Fremstilling av PE-disker foregikk på omtrent lik måte som produksjon av PEX-objekter, som beskrives nærmere i avsnitt 3.2. Plastmaterialet LE4147 kom som pellets, og det gikk med omtrent 3,0 gram til hvert objekt. Innstillingene for hydraulisk presse ved støping av PE-diskene kan leses av i tabell 3.1.

Tabell 3.1: Innstilling for hydraulisk presse ved støping av PE-disker. Støpeprosessen besto av tre sekvenser.

Sekvensnr.	Innstilling	Trykk [tonn]	Temperatur [°C]	Tid [min]
1	Lavtrykk	3,5	117	10
2	Høytrykk	25	170	2
3	Vannkjøling	25	–	10

3.1.2 Oksidering

Diskene av PE ble oksidert ved 170°C i et ventilert varmeskap. Denne temperaturen ble valgt da ekstrudering av PEX-kabler foregår ved tilsvarende temperatur. Riktignok foregår ekstruderingen ved et høyere trykk, men siden benyttet varmeskap ikke kunne trykksettes har oksideringen foregått ved atmosfæretrykk.

Viften som sørget for en jevn oksygentilførsel ble satt på maksimalt nivå, som i dette tilfellet tilsvarte nivå 4. Siden oksidasjonsprosessen foregikk ved en temperatur som er høyere enn PEs smeltepunkt, ble diskene lagt på teflonformer for å unngå at de ble deformerte. Før bruk ble teflonformene pusset ned med fint sandpapir og vasket med isopropanol.

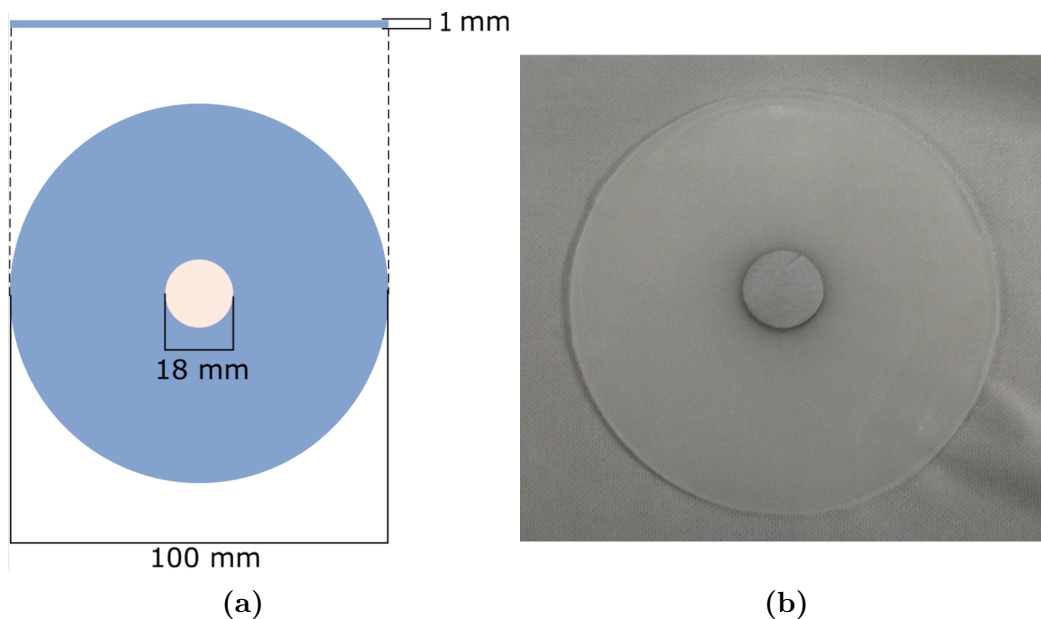
PE-diskene ble forsiktig tatt ut av teflonformene etter omtrent 24 timer med bruk av skalpell og pinsett, og deretter lagt inn i varmeskapet for videre oksidering. Etter 7 døgn i varmeskap ble objektene tatt ut. Objektene ble så fryst ned ved bruk av flytende nitrogen og videre malt opp til små partikler ved å benytte en såkalt *ball mill*, og kjent som *miksemølle*. Her ble små stålkuler og fryst PE lagt i en stålbeholder, som roterte ved påføring av mekanisk kraft.

PE-partiklene ble så sortert etter størrelse og spredt utover på teflonformer. Viften sto fortsatt innstilt på maksimalt nivå for å opprettholde en kontinuerlig oksygentilførsel. For å sørge for at PE-partiklene ble liggende i ro, til tross for at viften skapte luftstrømmer inne i varmeskapet, ble teflonformene med PE delvis pakket inn i tykk aluminiumsfolie.

Det var ønskelig å undersøke om oksidasjonsgrad påvirket PD-aktiviteten. PE-partiklene ble derfor oksidert i ulike tidsintervaller, i henholdsvis 7, 22 og 88 døgn. Etter endt oksidasjonstid ble partiklene oppbevart i sterile plastposer for så å bli støpt inn mellom 2 x 0,5 mm PEX-objekt. Et utvalg av PE-partikler og PE-disker aldrer fortsatt og er tiltenkt en eventuell videreføring av arbeidet.

3.2 Fremstilling av prøveobjekter

Produksjon av prøveobjekter foregikk i plastlaboratoriet til SINTEF. Plastmaterialet LS4201S fra Borealis ble benyttet til å fremstille flate, sirkulære PEX-objekter. Prøveobjektene hadde en fastsatt diameter på 100 mm, tykkelse på 1 mm og sirkulær elektrode med diameter på 18 mm, illustrert i figur 3.1a og 3.1b.



Figur 3.1: Illustrasjon av prøveobjekt i figur a, mens b viser ferdigstilt prøveobjekt med pådampet aluminiumselektrode.

En renslig arbeidsplass og bruk av rent utstyr var viktig under fremstillingen av prøveobjektene. Alt utstyr ble grundig vasket med isopropanol og alt arbeidet ble, så langt det var mulig, utført under flowbenk. At produksjonen foregikk under mest mulig sterile forhold var avgjørende med tanke på å unngå uønskede urenheter i prøveobjektene. Etter produksjon ble prøveobjektene oppbevart i sterile plastposer og kun berørt med engangshansker.

I hvert prøveobjekt som inneholdte forurensninger var det plassert ti partikler sentrert innenfor en radius på 18 mm. Merk at samtlige partikler, både PE- og stålpartikler, var irregulære og i størrelsesorden 355 – 500 μm . Objekter som inneholdte organiske forurensninger er merket $\text{PE}x$, hvor x indikerer antall døgn PE-partiklene hadde oksidert.

3.2.1 Støping

Støpeformer med en diameter på 100 mm ble benyttet. Både før og etter bruk ble støpeformene grundig rengjort med messingbørste og vasket med isopropanol.

Prøveobjektene skulle ha en tykkelse på 1 mm. Dette ble oppnådd ved å støpe sammen to objekter med 0,5 mm tykkelse. På denne måten kunne det enkelt legges inn ønskede forurensninger mellom to prøveobjekter, for så å støpe de sammen. Det var da viktig at partiklene lå sentrert i prøveobjektet, innenfor en diameter på 18 mm. Dette var nødvendig for å sikre at partiklene ble dekket av elektroden som senere ble påført prøveobjektet. For å oppnå en mest mulig identisk fremstilling av samtlige prøveobjekter ble også referanseobjektene, som ikke skulle inneholde forurensninger, fremstilt ved å støpe sammen 2 x 0,5 mm diskere.

For å støpe 0,5 mm tykke diskere ble 5,0 gram plastfilm av LS4201S veid opp, klippet i strimler og fordelt jevnt i støpeformene. Støpeformene lå mellom to metallplater, hvor maksimalt ni diskere kunne støpes om gangen. Mellom støpeformene og den øvre metallplaten ble det lagt en tykk plastfilm, som ble vasket med isopropanol og klipt opp slik at de passet en og en støpeform. Dette ble gjort for å oppnå en renere prosess samt at det forenklet arbeidet med å løsne prøveobjektene fra den øvre metallplaten.

Selve støpeprosessen foregikk i en forvarmet hydraulisk presse. Innstillingene for pressen kan leses av i tabell 3.2. Merk at objektene med 0,5 mm tykkelse ikke ble kryssbundet ved første støping.

To objekter med 0,5 mm tykkelse ble deretter støpt sammen og kryssbundet, i de samme formene som ble benyttet tidligere. Hvis prøveobjektet skulle inneholde forurensninger ble de lagt i mellom de to diskene, sentrert innenfor en diameter på 18 mm. Tabell 3.3 viser støpeinnstillingene. Merk at prøveobjektene nå ble kryssbundet.

Tykkelsen på prøveobjektene skulle være 1 mm, og da prøveobjektene var ferdig støpt ble tykkelsen målt. Et avvik på $\pm 0,15$ mm var akseptabelt, hvor de fleste prøveobjekt hadde en tykkelse på 0,95 mm etter endt produksjon.

Tabell 3.2: Innstilling for hydraulisk presse ved støping av 0,5 mm PEX-disker uten kryssbinding. Støpeprosessen besto av tre sekvenser.

Sekvensnr.	Innstilling	Trykk [tonn]	Temperatur [°C]	Tid [min]
1	Lavtrykk	3,5	117	10
2	Høytrykk	25	117	2
3	Vannkjøling	25	–	12

3.2 Fremstilling av prøveobjekter

Tabell 3.3: Innstilling for hydraulisk presse ved støping av 2 x 0,5 mm PEX-disker med kryssbinding. Støpeprosessen besto av tre sekvenser.

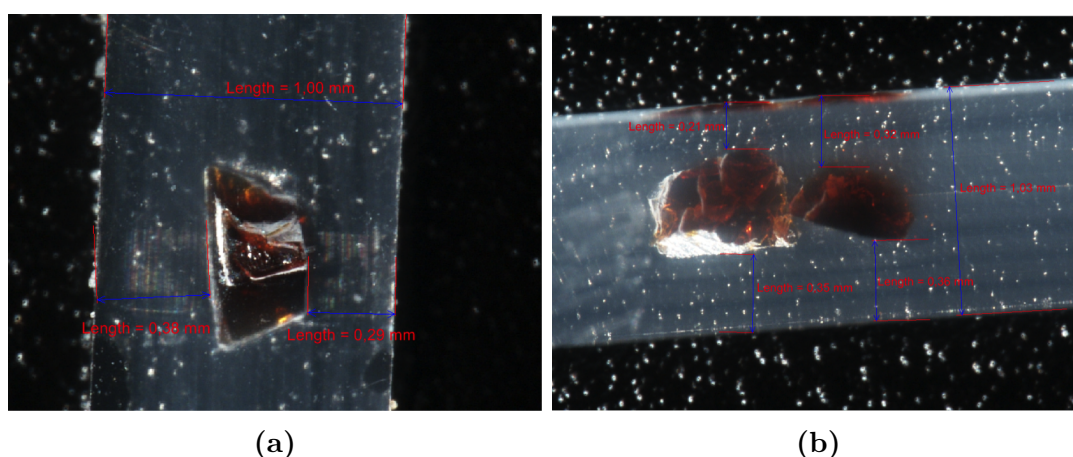
Sekvensnr.	Innstilling	Trykk [tonn]	Temperatur [°C]	Tid [min]
1	Lavtrykk	3,5	117	10
2	Høytrykk	25	170	50
3	Vannkjøling	25	–	18

3.2.2 Kondisjonering

For å bli kvitt biprodukter etter kryssbindingen måtte prøveobjektene kondisjoneres, også kjent som avgassing. Kondisjoneringen av PEX-objektene foregikk i varmeskap. Varmeskapet hadde en temperatur på 90°C, hvor prøveobjektene ble liggende i 72 timer ved atmosfæretrykk. Ved å kondisjonere prøveobjektene reduseres mengden av uønskede biprodukter som oppstår ved kryssbindingen.

3.2.3 Plassering av partikler

Et utvalg av prøveobjekter ble snittet opp og undersøkt i mikroskop for å se hvordan PE- og stålpartikler, i størrelsesorden 355 – 500 μm , lå plassert mellom 2 x 0,5 mm PEX-objekter. Samtlige partikler lå plassert omtrent midt i objektene, som ønsket. Se utvalgte bilder i figur 3.2.



Figur 3.2: Mikroskopbilde a og b viser hvordan PE-partiklene lå plassert i ferdigstilt prøveobjekt. Samtlige partikler som ble undersøkt lå plassert omtrent midt i objektene, som ønsket.

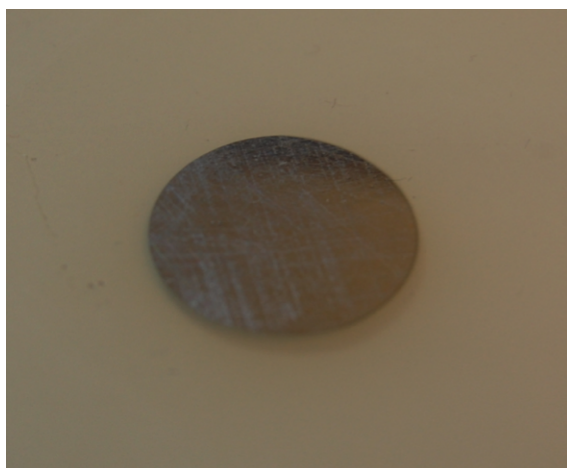
3.2.4 Påføring av elektrode

Elektrodene på prøveobjektene var sirkulære, med en diameter på 18 mm. For illustrasjon, se figur 3.1a og 3.1b. Elektrodene ble påført på begge sidene av prøveobjektet, så sentrert som mulig.

SINTEFs pådampingsmaskin ble benyttet til pådampingsprosessen. Spesiellagde masker fra verkstedet ble brukt, slik at elektrodene fikk en diameter på 18 mm. Pådampingen var en tidkrevende prosess, og det oppsto ofte avvik i sentreringen av elektrodene som ble påført på begge sidene av prøveobjektet. Typisk avvik var på omtrent 2 mm. Bruken av isopropanol på prøveobjektene etter pådampingsprosessen måtte unngås da isopropanol lett fjerner aluminiumselektroden. Hvis elektrodene derimot ikke lå sentrert, ble isopropanol benyttet til å vaske vekk elektroden på den ene siden, for å så dampe den på igjen. Etter endt pådampning kunne det ofte sees små aluminiumspartikler på overflaten av prøveobjektet. Trykkblåser ble derfor tatt i bruk for å fjerne disse partiklene, for å unngå forekomst av PD-aktivitet på overflaten av objektet.

Ved å dampe på aluminiumselektroder ble det oppnådd en jevn kontaktflate mellom elektrode på prøveobjekt og messingselektrodene. Se figur 3.3 for ferdig resultat.

Uønskede resultater førte til at preparering av prøveobjekt før påføring av aluminiumselektrode ble endret underveis i prosjektet. Det viste seg å være fordelaktig å pusse ned prøveobjektens overflate med et fint slipepapir (Silisumkarbid #2400). Dette ble gjort for at aluminiumselektroden skulle hefte bedre og ikke løsne fra prøveobjektene under PD-testingen.



Figur 3.3: Prøveobjekt med pådampet aluminiumselektrode.

3.3 Skanning elektronmikroskop

Det var ønskelig å undersøke de oksiderte partiklene nærmere ved bruk av skanning elektronmikroskop (SEM). SEM brukes i hovedsak for å undersøke partiklens topografi. Ved å sende en fokusert stråle med høyenergiske elektroner kan det oppnås bilder med en oppløsning opptil 0,4 nm.

JEOL SEM (JSM-6480LV), plassert på NTNUs renrom *NanoLab*, ble benyttet. Her kan bilder med en oppløsning på 4,0 nm oppnås. Prøveobjekter som inneholdt oksiderte PE-partikler ble studert. Det var ønskelig å se hvordan partiklene heftet til omliggende PEX-isolasjon og om partiklene hadde fått porøse områder på grunn av oksideringen.

3.3.1 Prøvepreparering

SEM setter et vist krav til størrelse og tykkelse på prøveobjektet som skal undersøkes. Polymerer er myke materialer og PEX-objektene ble derfor snittet ved bruk av mikrotom⁵. På denne måten ble det oppnådd en jevn overflate på testobjektet som skulle undersøkes i SEM, samt ønsket tykkelse.

For å unngå oppladning av testobjektet når det ble bestrålt av elektronstrålen måtte overflaten være elektrisk ledende[30]. Siden PEX er et ikke-ledende materiale måtte overflaten dekkes med en tynn metallfilm. Dette ble gjort ved å benytte en såkalt *sputter coater*. Da oppnådde man òg en økt termisk ledningsevne som igjen bidro til redusert degradering av polymerobjektet under SEM-undersøkelsen.

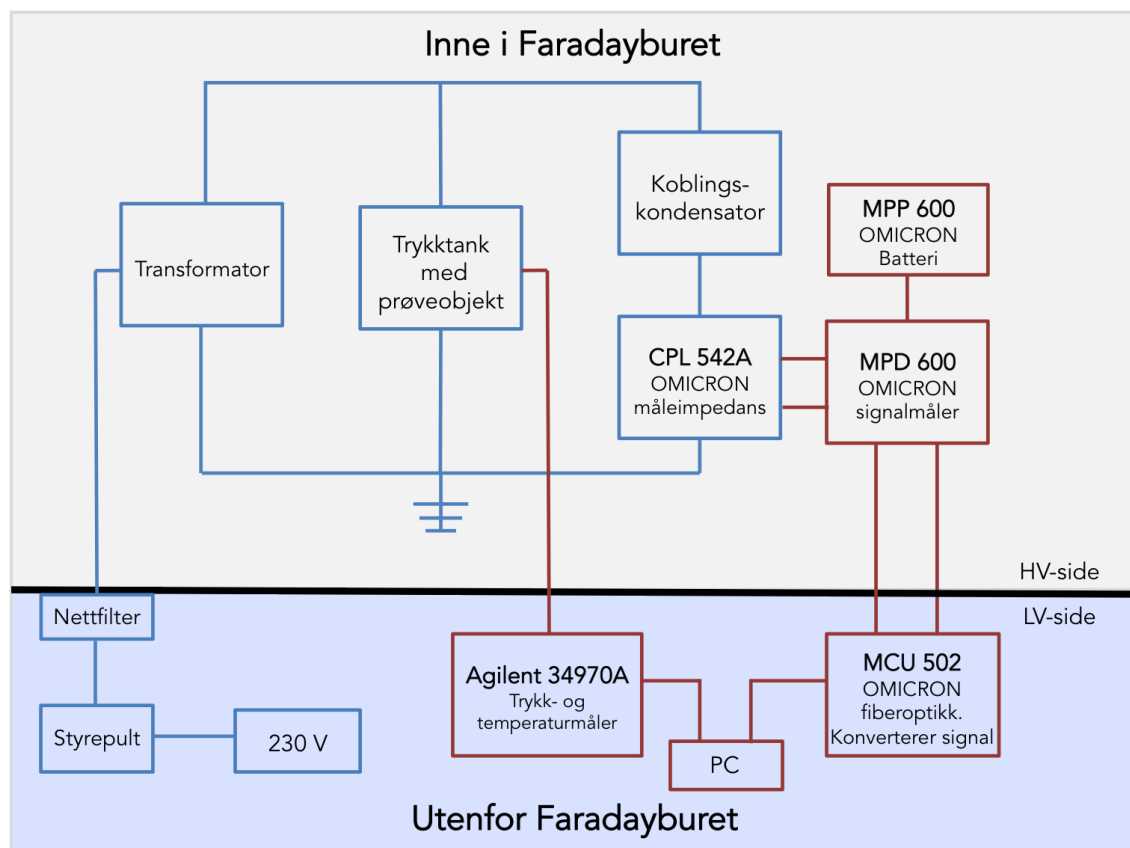
Testobjektet ble teipet fast til en aluminiumsbeholder med karbonteip, for så å bli plassert i en sputter coater for påføring av metallfilm. Sputter Coater (Cressington 208 HR B) på NTNU NanoLab ble benyttet. Metallfilmen besto av en 50/50-blanding av platina (Pt) og palladium (Pd). Metallfilmen bør være tynn for å få et mest mulig realistisk bilde av testobjektets topografi. Tykkelsen av den påførte filmen ble derfor satt til 5 nm.

⁵Mikrotom er et instrument som brukes til å snitte i tynne skiver.

3.4 Måleoppsett

Måling av partielle utladninger er svært sensitive målinger. For å unngå støy utenfra foregikk de eksperimentelle forsøkene i et Faradaybur. Figur 3.4 viser skjematisk fremstilling av målekrets benyttet til PD-måling.

Prøveobjektet ble installert i en trykktank fylt med silikonolje. Inne i Faradayburet sto trykktank med prøveobjekt, koblingskondensator med kapasitans på 800 pF, OMICRON-utstyr for måling av PD, samt transformator for å transformere opp spenningen. Spenningen, AC-spenning 50 Hz, ble styrt fra en styrepult som var plassert utenfor Faradayburet. Styrepulten er hovedsakelig en variabel autotransformator. På veggen på Faradayburet, mellom styrepulten og transformatoren, var det montert et filter for å kunne filtrere bort eventuell netstøy. Trykket i tanken ble trykket opp via en håndpumpe som også var montert på utsiden av Faradayburet.



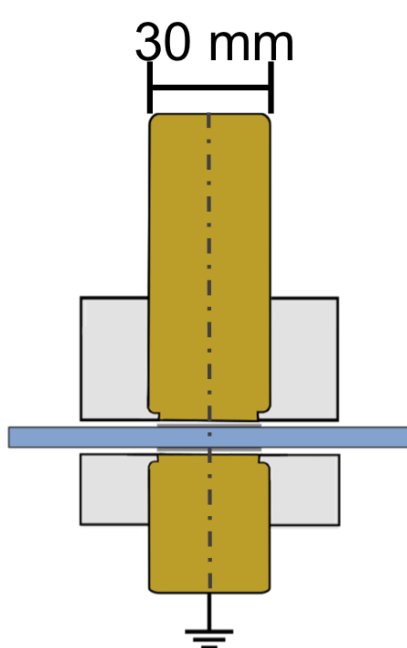
Figur 3.4: Skjematisk fremstilling av målekrets benyttet til PD-måling. Høyspentsiden befinner seg inne i Faradayburet, mens alt som foregikk på utsiden av Faradayburet er på lavspentsiden.

3.4.1 Arrangement i trykktank

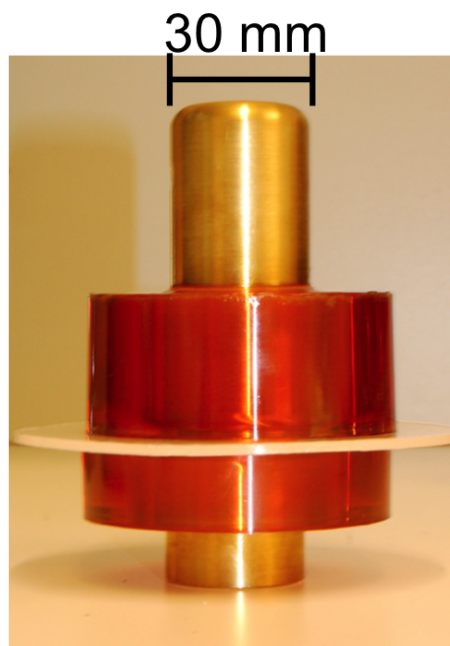
Trykktanken hadde følgende innhold:

- To messingelektroder støpt inn i epoxy, begge med diameter på 30 mm. Høyde: HV-elektrode: 70 mm, jordelektrode: 30 mm.
- Prøveobjekt med pådampet aluminiumselektroder. Diameter på 100 mm, og en nominell tykkelse på 1 mm. Påført sirkulær elektrode med en diameter på 18 mm.
- POM-støtte, som støtter prøveobjektet og messingelektrodene.
- Stativ for å holde oppe jordelektrode.

Messingelektrodene som ble benyttet var innstøpt i epoxy, illustrert i figur 3.5. Dette for å unngå forekomst av små luftbobler i kilen mellom elektrode og prøveobjekt. Grunnen til at det ble valgt å bruke epoxy er fordi det egner seg godt som isolasjonsmateriale. I tillegg fester det seg lett til metaller. Det ble frest ut et hakk i messingelektrodene for at epoxyen skulle hefte bedre.



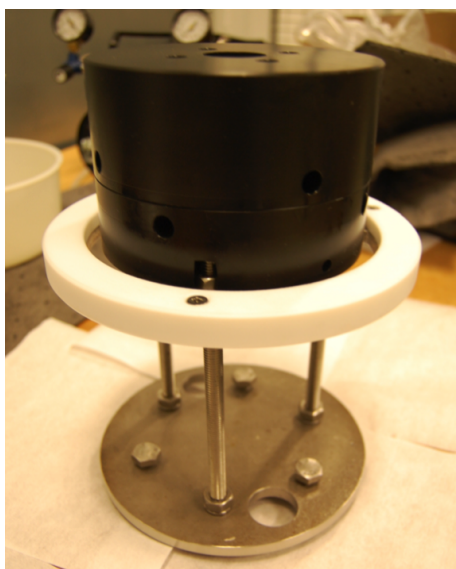
(a) Elektroder med epoxy.



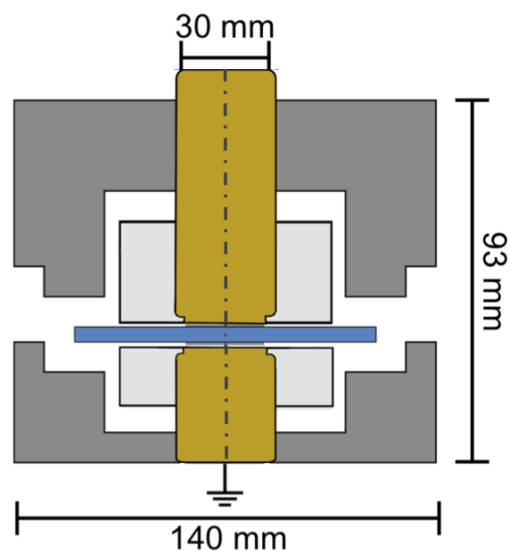
(b) Elektroder innstøpt i epoxy.

Figur 3.5: Figur a illustrerer høyspent- og jordelektrode med prøveobjekt i midten med epoxy. Forklaring til figur a: gult: messingelektroder, blått: prøveobjekt og grått: epoxy. Bilde b viser reelt bilde av elektrodene med prøveobjekt i midten.

Trykktanken var fylt med silikonolje (Xiameter PMX-200 50 cSt, fra Wacker). Silikonolje har relativt lik permittivitet som PEX, og på denne måten unngås feltforsterkninger. Tanken kunne trykkes opp til 22 bar, dette i hovedsak for å bli kvitt forekomst av luftbobler og for å unngå overslag langs overflaten på prøveobjektet. En håndpumpe som var plassert på utsiden av Faradayburet ble benyttet for å trykke opp tanken. Da trykket var hevet til ønsket nivå, ble ventilene inn til tanken stengt og håndpumpa ble trykkavlastet. En datalogger, Agilent 34970A, logget tankens trykk med en frekvens på 1 Hz. Figur 3.6 viser POM-støtten og stativ for jordelektrode. Hovedfunksjonen til POM-støtten var å støtte messingelektroden, samt å holde på plass prøveobjektet. Stativet var tilstede slik at komponentene slipper å installeres på bunnen av tanken, og bidrar med å løfte jordpotensialet opp fra tankbunnen. Illustrasjon av POM-støtte og prøveobjekt i figur 3.7.



Figur 3.6: Svart komponent er POM-støtten, og sto på et stativ som hadde til hensikt å holde utstyret oppe. Stativet ble installert på bunnen av trykktanken.



Figur 3.7: Illustrasjon av hvordan prøveobjektet lå mellom POM-støtten og messingelektroden. Gult: messingelektroder, blått: prøveobjekt, lys grått: epoxy og mørk grått: POM.

3.4.2 Montering av komponenter i trykktank

Det var viktig at monteringen av innholdet i trykktanken foregikk mest mulig identisk før hver testing for å bedre kunne sammenligne måledata. Først ble alt innhold i tanken tatt opp og midlertidig oppbevart i plastbøtter. Det er vanskelig å fjerne silikonolje fra tekstil, derfor ble egne lab-klær benyttet. Plasthansker ble også brukt, slik at innholdet enkelt kunne monteres uten å få silikonolje direkte på huden.

Montering av komponenter i trykktank foregikk i følgende steg:

1. Jordelektroden og nedre del av POM-støtten ble løftet fra bunnen av tanken ved bruk av spesiellagde messingpinner. Nevnt utstyr ble løftet slik at det ble liggende å flyte i væskeoverflaten til silikonoljen. Her lå det støtt, så lenge det ikke ble påført for stor kraft slik at den sank til bunnen.
2. Prøveobjektet som skulle monteres i tanken ble så dyppet i silikonolje. På denne måten oppnådde man en tynn oljefilm mellom messingelektroden og elektroden på prøveobjektet.
3. Prøveobjektet ble deretter plassert på jordelektroden og nedre del av POM-støtten. Det var viktig å sørge for at elektroden på prøveobjektet lå sentrert på jordelektroden.
4. Deretter ble høyspentelektroden satt på prøveobjektet. Øvre del av POM-støtten ble plassert ned over høyspentelektroden, og til slutt ble øvre og nedre del av POM-støtten presset sammen.
5. Alt dette ble deretter forsiktig senket ned i silikonoljen.
6. Til slutt ble lokket montert på trykktanken.

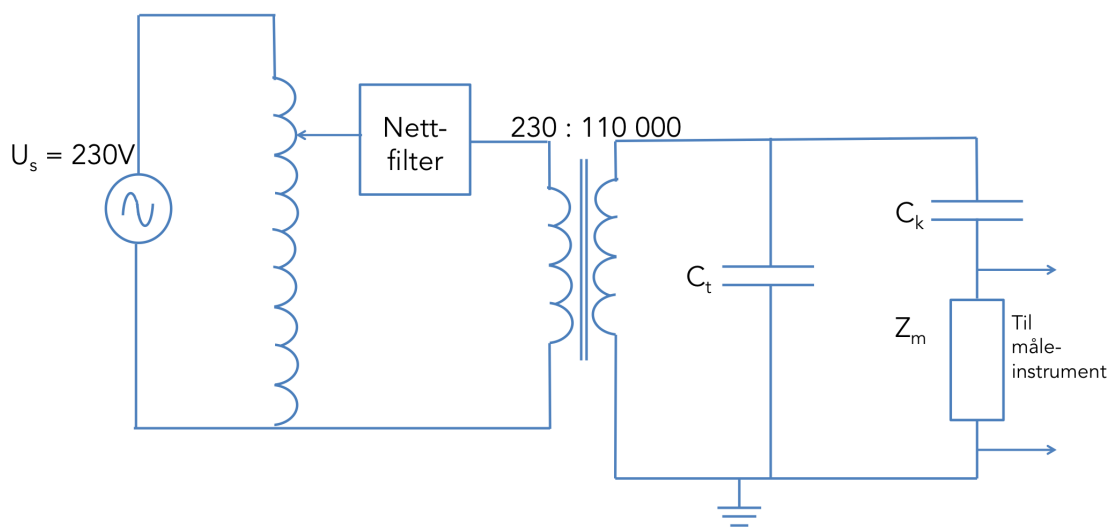
Under målingene ble det observert at trykket i tanken etter hvert begynte å falle raskere enn normalt. Dette skyldes slitasje på pakningen (O-ring) som satt på trykklokket. Slitt O-ring bør derfor erstattes med ny ved behov.

3.5 Måling av partielle utladninger

Måling av partielle utladninger ble utført ved å benytte apparatur fra OMICRON. Støygulvet, *threshold*, ble satt til 0,9 pC. Merk at innstillingene for utladningsnivå ikke bør stå på *Auto Gain*. Ved store utladninger vil OMICRONs software justere nivå for å klare å måle denne utladningen. I etterkant av level-endring kommer det et støybånd som vil forstyrre pågående målinger. Derfor benyttes ikke *Auto Gain*, og gain står innstilt på level 7. På dette gain-nivået kan utladninger med størrelse fra 0,9 pC opp til omtrent 200 pC måles.

Under PD-målinger ble testobjektet utsatt for en påtrykt sinusspenning, med nettfrekvens på 50 Hz. Ved forekomst av partielle utladninger vises disse i OMICRONs software, i et såkalt PRPDA⁶-plot. Et slikt plot gir informasjon om utladningens polaritet, størrelse og posisjon i forhold til spennings fase. Fargen indikerer intensiteten på utladningene. Informasjon som størrelse på største ladning, antall registrerte utladninger og gjennomsnittsladning vises også. All data kan eksporteres til MatLab-kompatible filer. Merk at ladningsaksen er logaritmisk.

Før PD-måling ble kretsen kalibrert med hjelp av PD-kalibrator som sendte inn en kjent ladning. Figur 3.8 viser målekretsen som ble benyttet ved PD-målinger.



Figur 3.8: Målekrets benyttet under PD-måling. C_t er kapasitansen til testobjektet, C_k er koblingskondensatoren og Z_m er måleimpedansen.

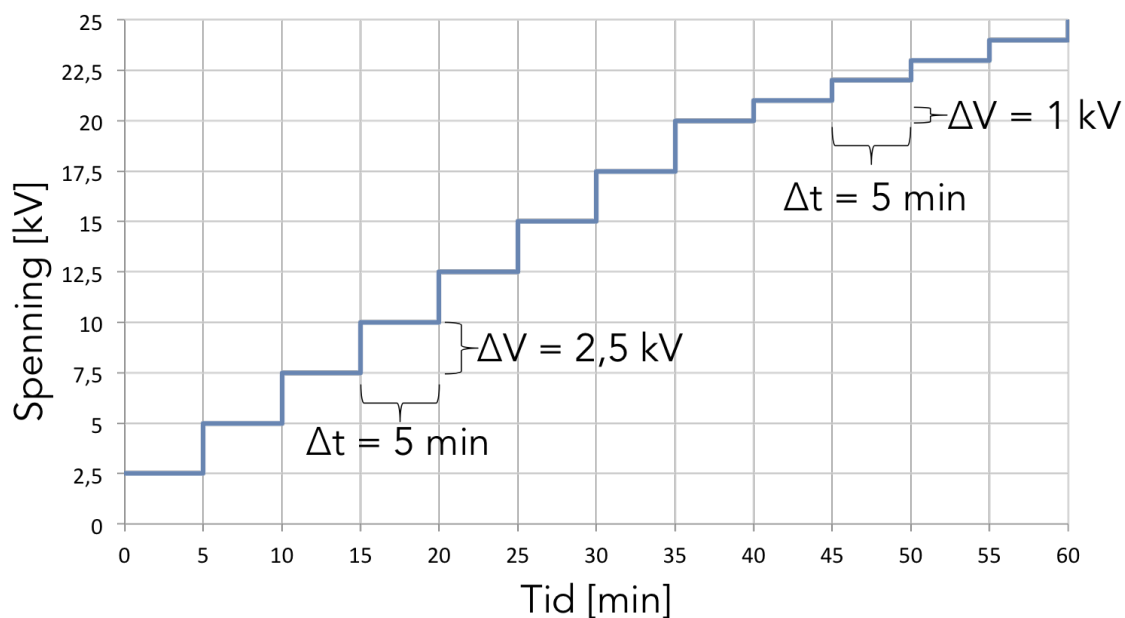
⁶PRPDA = Phase Resolved Partial Discharge Analysis.

I forstudiet til masteroppgaven ble det gjennomført gjennomslagsmålinger for å identifisere holdfastheten til plane, sirkulære PEX-objekt. Prøveobjektene hadde da en nominell tykkelse på 2 mm, ikke 1 mm. Gjennomslagsmålingene ble utført i tråd med ASTM⁷ sin standard for måling av gjennomslagsspenning og dielektrisk styrke, ASTM D149[31]. Prøveobjektene holdfasthet kunne ikke fastlås med sikkerhet da målingene kun ble utført på fire prøveobjekter, men er større enn 30 kV/mm[13]. I andre studier har holdfastheten til PEX blitt bestemt til 100 kV/mm[32]. Benyttet OMICRON-utstyr var verdifullt og sårbart, derfor var det ikke ønskelig å få gjennomslag i prøveobjektet da dette utstyret var tilkoblet kretsen. Maksimalt påtrykt spenning ved PD-målinger med OMICRON-utstyr tilkoblet ble derfor satt til 35 kV.

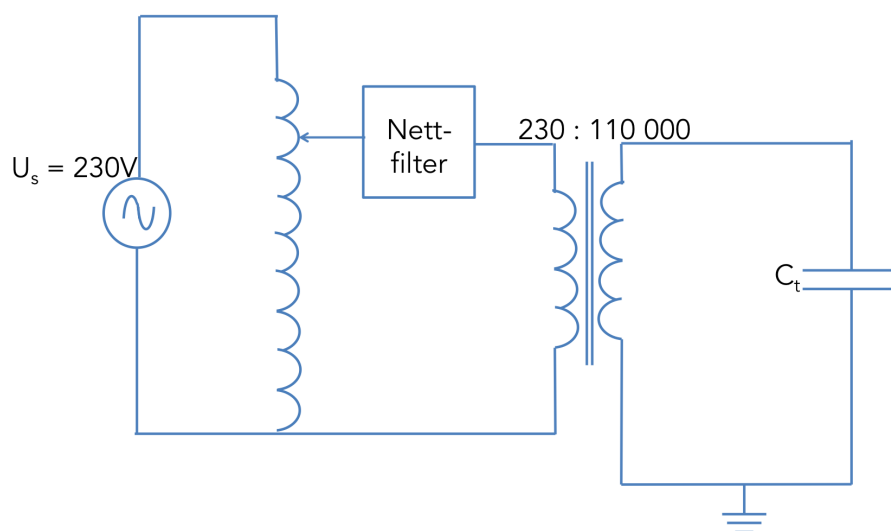
Følgende prosedyre ble fulgt ved måling av PD-aktivitet:

1. Prøveobjektene ble montert i tanken i henhold til avsnitt 3.4.2. Trykket i tanken ble så trykket opp til $20 \pm 0,5$ bar. Målingene av PD begynte da tanken, med prøveobjektet installert, hadde vært trykksatt i 17 timer \pm 30 min. I løpet av de 17 timene falt trykket ned til omtrent 16 – 17 bar. Tanken ble derfor alltid trykket opp til $20 \pm 0,5$ bar like før måleoppstart.
2. Startspenningen ble satt til 2,5 kV, 5 minutters måling. Deretter: 2,5 kV spenningsøkning på hvert steg, 5 minutters måling på hvert steg. Se illustrasjon av måleprosedyre i figur 3.9.
3. Da spenningen hadde nådd 20 kV økte spenningsstegene med 1 kV, fortsatt 5 minutters måling på hvert steg. Se igjen figur 3.9. Maksimalt påtrykt spenning: 35 kV.
4. Ved forekomst av repeterende PD-aktivitet:
 - (a) Den gjeldende spenningen ble definert som tennspenningen - PDIV.
 - (b) Spenningen ble deretter nedjustert med steg på 1 kV, 5 minutter på hvert steg, helt til repeterende PD-aktivitet forsvant. På denne måten ble slukkespenningen PDEV identifisert.
5. Ved ingen forekomst av repeterende PD-aktivitet før maksspenning på 35 kV var nådd:
 - (a) Trykktank med prøveobjekt ble holdt uendret.
 - (b) Koblingskondensatoren og OMICRON-utstyret ble frakoblet kretsen for å beskytte det mot et eventuelt gjennomslag. Se målekrets i figur 3.10.
 - (c) Oppsettet ble spenningsatt, 30 kV i 23 timer.
 - (d) PD-måling ble deretter utført på nytt, jamfør punkt 1, til PDIV og PDEV kunne identifiseres.

⁷ASTM = American Society for Testing and Materials.



Figur 3.9: Illustrasjon av hvordan måleprosedyren ved PD-måling foregikk.



Figur 3.10: Målekrets benyttet når OMICRON-utstyret og koblingskondensatoren var frakoblet kretsen. C_t er kapasitansen til testobjektet.

Støy

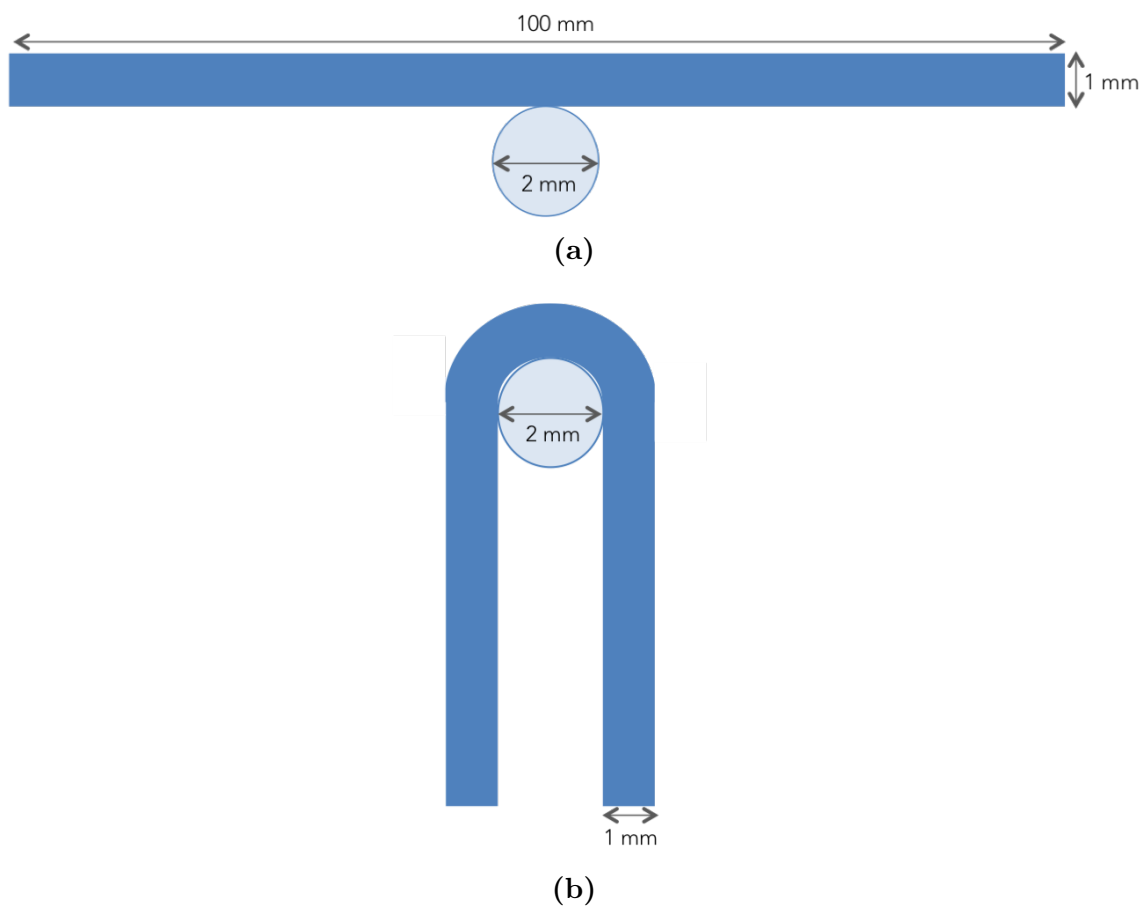
Måling av partielle utladninger er sensitive målinger. Og til tross for at PD-målingene foregikk i et Faradaybur, var det ofte forekomst av støysignaler. Typisk for støysignal var utladninger som ikke var repeterende, og kom innenfor en kort tidsperiode på omtrent 1 – 5 sekunder. Ved å observere utladningene over tid kunne man derfor enkelt skille støy fra reelle utladninger. Enkelte dager foregikk det parallelle forsøk i andre nærliggende laboratorier som ga økt støy. I blant kunne det oppleves en økning av PD-signaler da døren til laboratoriet ble lukket eller åpnet. Dette kunne også oppstå da lysrørene i taket ble slått på eller skrudd av. Alle PD-målingene ble derfor tatt med *Stream Record*, hvor all data kontinuerlig ble lagret. På denne måten kunne den PD-dataen som var kraftig påvirket av støy plukkes ut og fjernes. Støygulv på alle PD-målinger lå omtrent på 1 pC.

3.5.1 Mekanisk påkjenning og elektrisk kondisjonering

Et utvalg prøveobjekter med innlagte forurensninger ble utsatt for en sterkere mekanisk og elektrisk påkjenning for å undersøke om dette ville føre til økt PD-aktivitet.

Følgende prosedyre ble da fulgt:

1. Prøveobjektet ble PD-testet i tråd med prosedyre beskrevet i avsnitt 3.5. PDIV og PDEV ble identifisert.
2. Prøveobjektet ble grundig vasket med isopropanol for å fjerne silikonoljen. Deretter ble objektet mekanisk belastet ved å bli bøyd rundt ett rør med en diameter på 2 mm, 50 ganger til hver side. Se illustrasjon i figur 3.11.
3. Nye aluminiumselektroder ble dampet på, og prøveobjektet ble igjen PD-testet. Ny PDIV og PDEV ble identifisert.
4. Deretter ble prøveobjektet elektrisk kondisjonert ved å kjøre langtidstesting:
 - (a) Trykktank med prøveobjekt ble holdt uendret. OMICRON-utstyret og koblingskondensatoren ble frakoblet kretsen som illustrert i figur 3.10.
 - (b) Oppsettet ble spenningsatt, 25 kV i 8 døgn.
5. Etter endt langtidstesting ble igjen prøveobjektet PD-testet for å undersøke eventuelle endringer i målingene. Ny PDIV og PDEV ble identifisert.



Figur 3.11: Figur a og b viser hvordan prøveobjektet ble utsatt for mekanisk påkjenning ved å bøye objektet rundt ett rør med diameter på 2 mm, 50 ganger til hver side. Dette ble gjort for å undersøke om økt mekanisk belastning ville bidra til endring av PD-aktivitet.

4 Resultater og diskusjon

4.1 Måling av partielle utladninger

Det har blitt utført PD-målinger på plane, sirkulære prøveobjekter av PEX med en diameter på 100 mm og en nominell tykkelse på 1 mm. Til sammen har fem ulike prøveobjektkategorier blitt testet for partielle utladninger:

- **Referanse:** Prøveobjekt uten forurensninger.
- **Stål:** Prøveobjekt med uorganiske forurensninger - 10 stålpartikler.
- **PE7:** Prøveobjekt med organiske forurensninger - 10 PE-partikler oksidert i 7 døgn.
- **PE22:** Prøveobjekt med organiske forurensninger - 10 PE-partikler oksidert i 22 døgn.
- **PE88:** Prøveobjekt med organiske forurensninger - 10 PE-partikler oksidert i 88 døgn.

Merk at samtlige partikler var irregulære og i størrelsesorden 355 – 500 μm .

4.1.1 Påvirkning av degraderte aluminiumselektroder

Tidlig i prosjektet ble det oppdaget at prøveobjektene pådampede aluminiumselektrode flasket av under PD-målingene, se figur 4.1. For at elektrodene skulle hefte bedre til prøveobjektet ble det bestemt å pusse ned objektene overflate med fint slipepapir (Silisumkarbid #2400) før aluminiumselektrodene ble dampet på. Dette viste seg å ha en god effekt, da samtlige prøveobjekter hvor slipepapir ble benyttet beholdte opprinnelig form på aluminiumselektrodene.

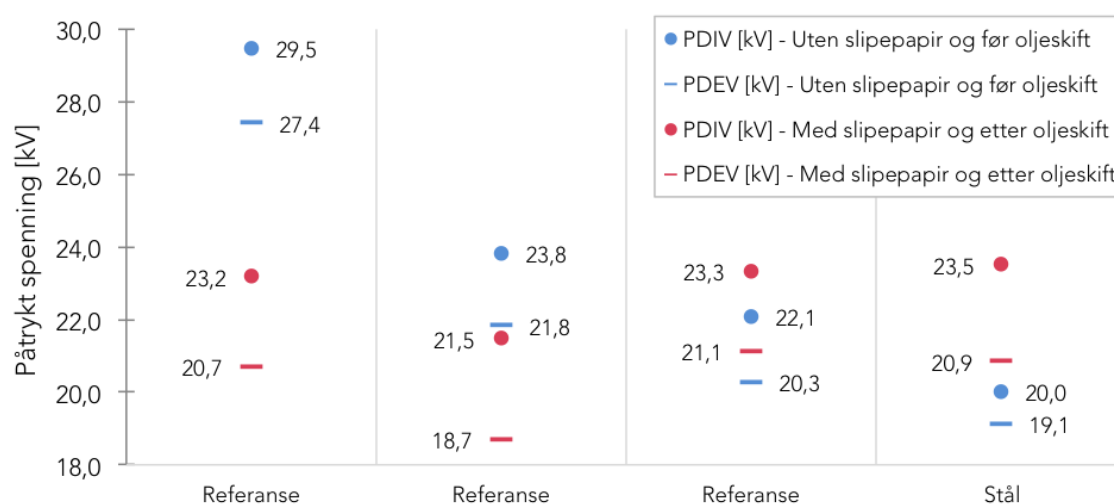
De små aluminiumspartiklene som stammet fra de degraderte elektrodene ble liggende å flyte i silikonolje. Aluminium er et ledende materiale, og det ville vært uheldig å ha elektrisk ledende partikler i tanken når prøveobjekter skulle PD-testes. Det ble derfor bestemt å skifte silikonolje. Tanken ble tømt og vasket med isopropanol, og deretter fylt med ny olje. Papirfillene som ble brukt til å tørke tanken og utstyret ble undersøkt i mikroskop, hvor mange små aluminiumspartikler ble identifisert. Mest sannsynlig stammet disse fra aluminiumselektrodene.

4.1 Måling av partielle utladninger



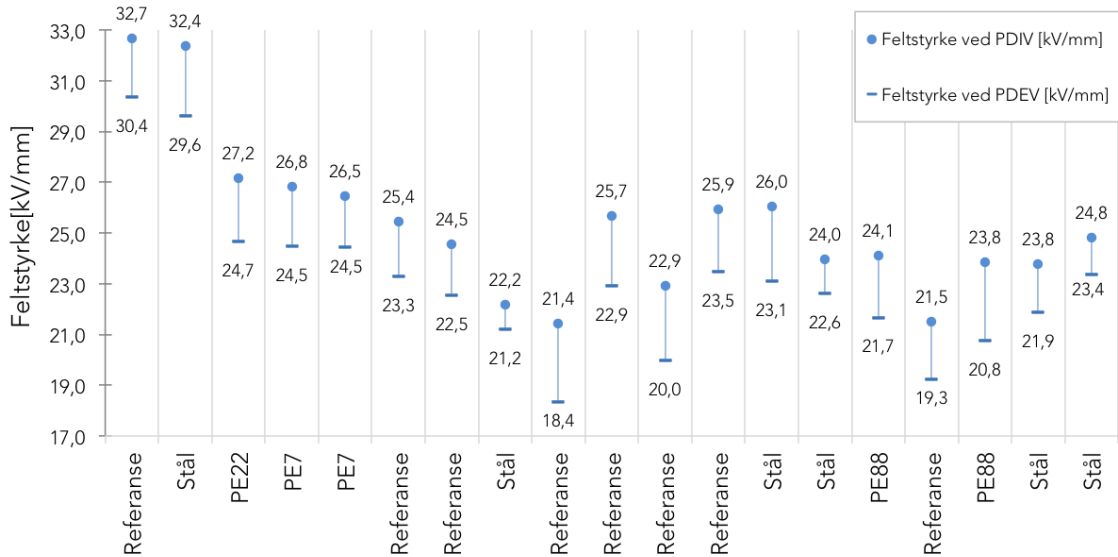
Figur 4.1: Bildet viser hvordan degradert aluminiumselektrode så ut, hvor deler av elektrodene hadde flasket av under PD-testing. Slipepapir (Silisumkarbid #2400) ble deretter benyttet til å forsiktig pusse ned prøveobjektens overflate før pådamping av aluminium. Dette viste seg å ha en god effekt da samtlige prøveobjekter som ble pusset med slipepapir bevarte opprinnelig form på aluminiumselektroden.

Ved å sammenligne måledata utført på fire prøveobjekter både før og etter oljeskift og bruk av slipepapir, presentert i figur 4.2, kan det ikke sees markante endringer av hverken PDIV eller PDEV. Dette indikerer at endring av prøveobjektene ved å slippe de ned før pådamping ikke hadde betydelig innvirkning på tenn- og slukkespenning. Aluminiumspartiklene som fløt i oljen hadde heller ingen markant innvirkning. Det konkluderes derfor med at PD-resultatene er sammenlignbare uavhengig av om slipepapir ble benyttet.



Figur 4.2: PD-målinger utført på fire prøveobjekter. Målinger markert i blått er utført før oljeskift, og prøveobjektene hadde da ikke blitt pusset ned med slipepapir. PD-målingene utført etter oljeskift på prøveobjekter hvor slipepapir ble benyttet er markert i rødt. Markante endringer av PDIV og PDEV ble ikke observert. Det kan derfor konkluderes med at hverken aluminiumspartiklene som fløt i oljen eller bruk av slipepapir påvirket tenn- og slukkespenning. PD-data kan derfor sammenlignes uavhengig av når målingene ble utført.

4.1.2 Resultater fra PD-måling utført på fem ulike prøveobjektkategorier

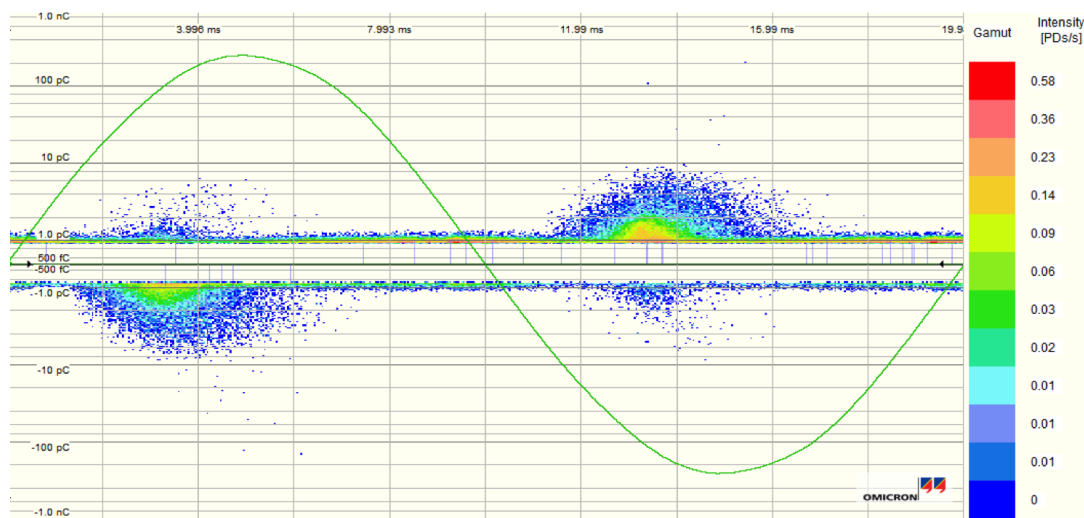


Figur 4.3: Resultatene fra PD-måling utført på fem ulike prøveobjektkategorier. Figuren viser feltstyrke ved tenn- og slukkespenning [kV/mm]. Målingene er sortert etter dato, fra eldst til nyest. Feltstyrken ved PDIV og PDEV avhenger ikke av type prøveobjekt.

Figur 4.3 viser feltstyrken ved tenn- og slukkespenning for samtlige PD-målinger utført. Ved å studere figuren sees det at feltstyrken ved PDIV og PDEV ikke avhenger av type prøveobjektkategori. Prøveobjektene med innlagte partikler viser hverken tegn til tidligere eller sterkere PD-aktivitet. Det har altså ikke blitt observert PD på laboratoriet som skyldes de innlagte forurensninger, hverken de organiske og uorganiske. Observerte utladninger skyldes trolig oppsettet.

Samtlige observerte utladninger var relativt små, fra 1 – 4 pC. 10 pC er satt som øvre akseptable utladningsgrense når nye kabler PD-testes i fabrikk[11]. Eksempel på typisk utladningsmønster som oppsto på laboratoriet kan sees i figur 4.4. Utladningsmønster og størrelse på utladninger var relativt likt ved samtlige målinger, helt uavhengig av prøveobjektkategori.

4.1 Måling av partielle utladninger

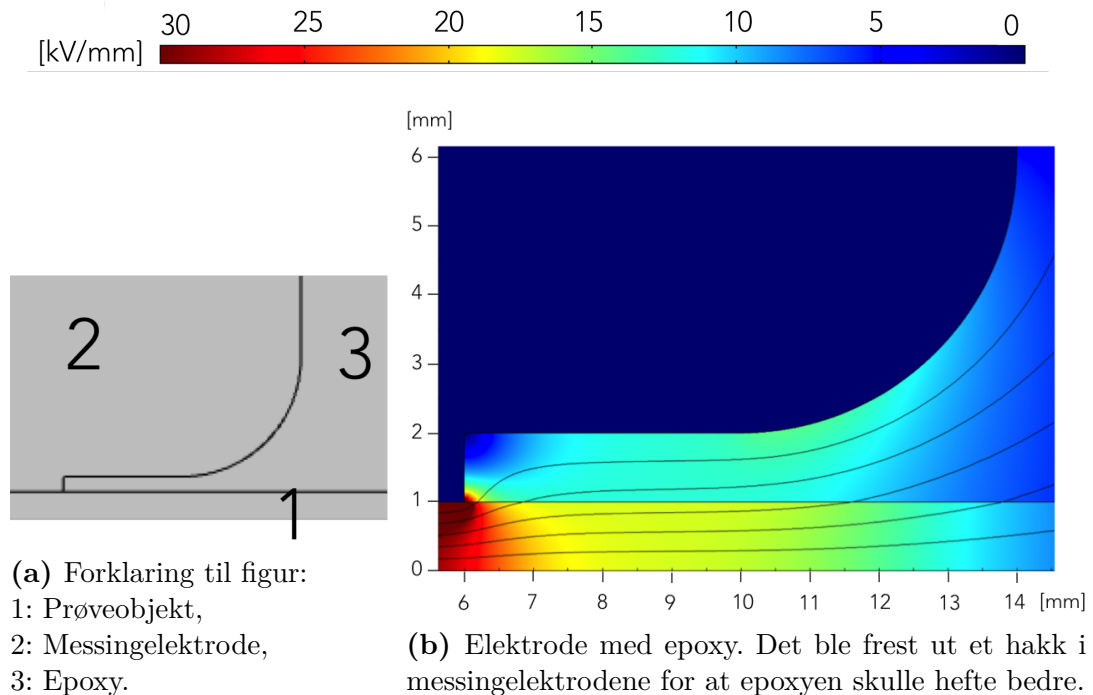


Figur 4.4: Eksempel på typisk utladningsmønster som oppsto, uavhengig av prøveobjektkategori. Dette plottet er hentet fra PD-måling utført på et referanseobjekt. Påtrykt spenning var 23,2 kV som tilsvarte en feltstyrke på 25,7 kV/mm. Utladningsnivået lå rundt 3 pC. Merk at ladningsaksen er logaritmisk og fargen indikerer intensiteten på utladningene.

I forsøk på å lokalisere de observerte utladningene ble en PD-måling utført på tom trykktank. Tanken inneholdt da kun en toroide, og oppsettet var utladningsfritt opp til 45 kV. Merk at målingene ble avsluttet ved 45 kV på grunn av restriksjoner til endeavslutningen på kableen som var montert på trykktanken, og ikke på grunn av PD-aktivitet. De observerte utladningene må derfor ha oppstått i utstyret som på dette tidspunktet var tatt ut av tanken, det vil si i rundt POM-støtten, messingelektroden innstøpt i epoxy og prøveobjektet. Nevnt utstyr kan sees i figur 3.7 i avsnitt 3.4.1.

I forstudiet til masteroppgaven ble det også gjort måling av partielle utladninger, og ved samtlige målinger utført var både PDIV og PDEV over 30 kV[13]. Tykkelsen på prøveobjektene var da 2 mm, ikke 1 mm. PD-målingene gjennomført i denne oppgaven ble utført i samme laboratorieoppsett, men tenn- og slukkespenningene var aldri over 30 kV, PDIV og PDEV lå som regel i området 20 – 24 kV. Laboratorieoppsettet var identisk med oppsettet benyttet i forstudiet, sett bort fra prøveobjektene som hadde halvert tykkelse. Dette antyder at observerte utladninger ikke avhenger av påtrykt spenning [kV], men av feltstyrken [kV/mm]. Observert PD-aktivitet må derfor være knyttet til prøveobjektet, siden dette var det eneste i oppsettet som var endret.

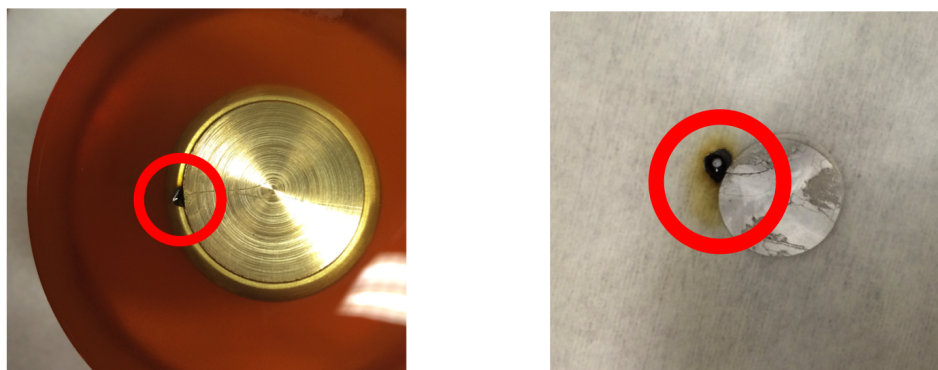
Grensesjiktet mellom prøveobjektets overflate og messingelektroden innstøpt i epoxy ble utsatt for et høyt elektrisk felt under testing og trippelpunkt er kjent for å være kritiske. I forstudiet til masteroppgaven ble det gjort simuleringer av feltstyrke og potensial rundt høyspentelektroden[13]. COMSOL-simuleringen, se figur 4.5, viser at feltstyrken i grensesjiktet er 15 – 30 kV/mm. Høyere felt gir som kjent økt sannsynlighet for forekomst av delutladninger.



Figur 4.5: COMSOL-simulering av felt og potensial rundt høyspentelektroden. Simuleringen ble utført i forstudiet til rapporten[13]. Fargen indikerer feltstyrken [kV/mm] mens konturen viser elektrisk potensial [V]. Feltstyrken i grensesjiktet mellom prøveobjektets overflate og messingelektroden innstøpt i epoxy hvor utladningene kan ha oppstått er høyt, fra 15 – 30 kV/mm.

Resultatene fra PD-målingene fremstilt i figur 4.3 er sortert etter dato målingene ble utført, fra eldst til nyest. Feltstyrken ved PDIV og PDEV i de to første målingene var høyere sammenlignet med resten av måledataen. Feltstyrken ved tennspenningen til de to første målingene lå på 32 kV/mm, mens resterende målinger lå mellom 21 – 27 kV/mm. Reduksjon av tenn- og slukkespenning kan skyldes slitasje på epoxyen. PD-aktivitet kan medføre mekaniske skader, og det kan derfor tenkes at slitasje av epoxyen kan ha resultert i små hulrom og sprekker. Messingelektroden innstøpt i epoxy ble derfor undersøkt i mikroskop, hvor det ikke ble gjort funn av hverken hulrom eller sprekke-dannelser i overgangen fra elektrode til epoxy. Det så ut til at epoxyen hadde god heft til messingelektroden.

Et prøveobjekt med PE88-partikler hadde vært spenningsatt i 8 døgn og skulle deretter PD-testes. Under PD-måling fikk man et gjennomslag ved 24,9 kV, se figur 4.6. På prøveobjektets overflate, se figur 4.6b, ble det observert et brunt område rundt gjennomslaget. Dette bekreftet mistanken om forekomst av utladninger i grensesjiktet mellom overflaten til prøveobjektet og messingelektroden innstøpt i epoxy.



(a) Messingelektrode og epoxy etter gjennomslag. (b) Prøveobjekt etter gjennomslag. Også pådampet aluminiumselektrode fikk synlige skader.

Figur 4.6: Gjennomslag i prøveobjekt med PE88-partikler. Gjennomslag ved 24,9 kV, som tilsvarer en feltstyrke på 27,6 kV/mm. I figur b kan det sees et brunt område rundt gjennomslaget som indikerer at det har vært utladninger i dette området.

Ved å visuelt studere og berøre messingelektroden kunne det se ut til at epoxyen lå forhøyet sammenlignet med selve messingelektroden. På bakgrunn av dette ble det bestemt å undersøke elektrodene i profilometer⁸.

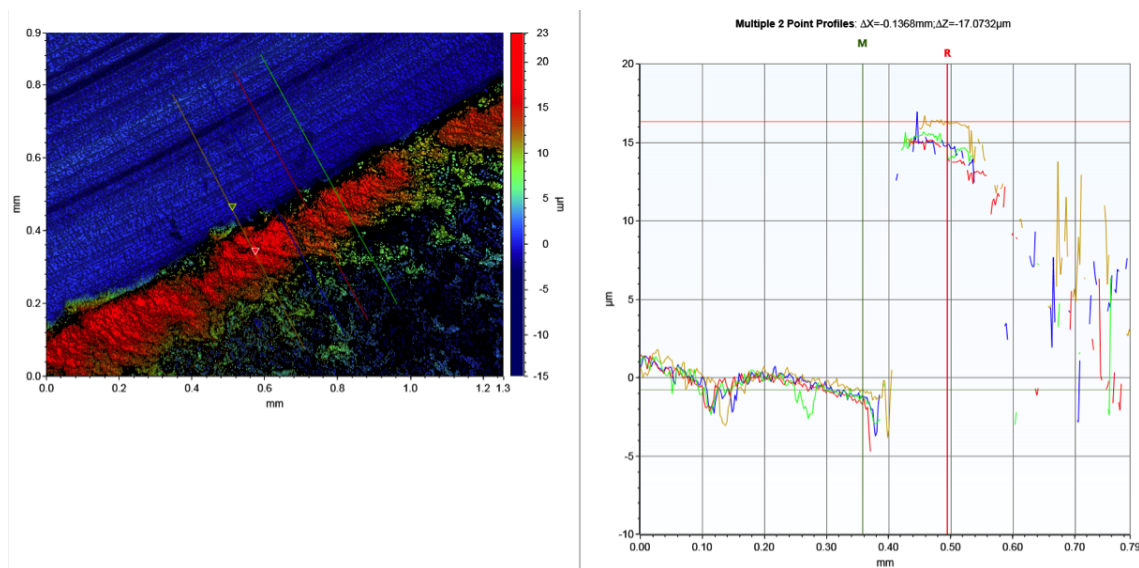
Undersøkelsen av elektrodene i profilometer ble gjort av Jorunn Hølto ved SINTEF Energi. Undersøkelsen av høyspentelektroden viste en høydeforskjell på 10 – 21 μm mellom messingelektrode og epoxy. Se 3D-plot og graf i figur 4.7. Jordelektroden ble også undersøkt. Her lå høydeforskjellen mellom messingelektrode og epoxy på 5 – 10 μm . Samtlige bilder fra undersøkelsen gjort i profilometer ligger i vedlegg B.

Høydeforskjellen mellom epoxy og messingelektrode bekreftet nok en gang antagelsen om forekomst av utladninger i grensesjiktet mellom prøveobjektets overflate og messingelektroden innstøpt i epoxy. På grunn av forhøyningen av epoxyen ble ikke messingelektroden liggende i direkte kontakt med pådampet aluminiumselektrode, noe som førte til PD-aktivitet i dette området.

Før samtlige PD-målinger ble tanken trykksatt til $20 \pm 0,5$ bar. Vekten av høyspentelektrode med epoxy ble liggende på prøveobjektets overflate. Kraften som elektroden påførte objektet, tyngde minus oppdrift, ble funnet til å være 3,575 N. Dette tilsvarer et trykk på 1014 Pa. For å unngå forekomst av PD i grensesjiktet mellom elektrodeoppsett og prøveobjekt bør trykket økes, i tillegg til å benytte elektroder hvor epoxy og messingelektrode ligger i eksakt samme høyde.

⁸Profilometer er et måleinstrument som brukes til å måle gjenstandens overflateprofil.

4.1 Måling av partielle utladninger



Figur 4.7: Høyspentelektroden innstøpt i epoxy ble undersøkt i profilometer. Resultatene indikerer en maksimal høydeforskjell på 21 μm mellom messingelektrode og epoxy.

4.1.3 Forskjell mellom laboratorieforsøk og idriftsatt kabel

Som presentert i forrige avsnitt ble det ikke observert PD-aktivitet som skyldes de innlagte forurensningene. Organiske partikler har blitt lokalisert i en idriftsatt 35 kV TR-PEX-kabel ved hjelp av PD-måling[12]. Størrelsen på delutladningene er ikke kjent. Det er altså mulig å lokalisere forurensninger i isolasjonen ved å utføre PD-testing selv om dette ikke har blitt gjenskapet på laboratoriet. Laboratorieeksperimentene utført på prøveobjektene vil til en viss grad avvike fra en idriftsatt kabel.

Dimensjonene til kabelen hvor det ble gjort funn av organiske partikler er ukjente. Ved å benytte verdier fra ANSI⁹[33] for 35 kV, 60 Hz, TR-PEX-kabler kan det antas at de nevnte partiklene har vært utsatt for et elektrisk felt på 1,5 – 2,5 kV/mm i drift. Dette står i sterk kontrast til målingene presentert i denne rapporten, hvor prøveobjektene vært utsatt for en feltstyrke opp til 30 kV/mm. Feltstyrken har derfor vært høy nok til å skulle tenne utladninger fra de innlagte partiklene.

Lengden på største partiklene har blitt beregnet til å være omtrent 3,0 – 4,5 mm. Dette er en god del større enn partiklene benyttet på laboratoriet, som var i størrelsesorden 355 – 500 μm . Partikkelstørrelse kan ha innvirkning på PD-aktivitet. Fra figur 1.2 kan det se ut til at identifiserte partikler var gulaktige i fargen. Observasjoner gjort i denne rapporten tilsier at partiklene da har oksidert i underkant av en uke. Denne antagelsen er gjort kun ved å studere fargen, og kan derfor ikke fastslås med sikkerhet. Fargeendringen skyldes biprodukter som antioksidantene gir fra seg når de brytes ned. Konsentrasjon av antioksidanter avhenger av materialleverandør. PE-material oksidert i denne oppgaven kommer fra Borealis, men det er ikke kjent hvilken materialleverandør kabelen i USA stammer fra. Det må også nevnes at vanntrehekkende PEX kan ha ulike materialegenskaper sammenlignet med PEX- og PE-material benyttet i denne oppgaven. Ulike materialegenskaper kan for eksempel ha påvirket heft.

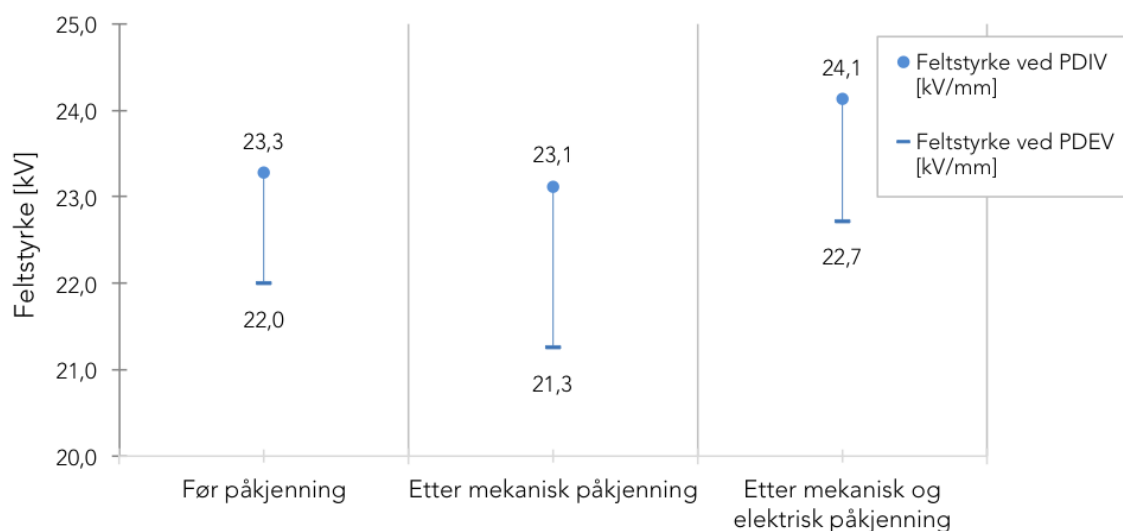
En sentral forskjell mellom laboratorieforsøk og en idriftsatt kabel er tiden objektene har vært spenningssatt. PD-målingene utført på prøveobjekter presentert i figur 4.3 har vært spenningssatt i fire timer, mens kabelen i USA har vært i drift fra år 2010 til 2015. En idriftsatt kabel vil òg oppleve termiske variasjoner på grunn av lastendringer. I tillegg vil en kabel utsettes for en hardere mekanisk belastning under både produksjon og installasjonen. Prøveobjektene som ble PD-testet ble behandlet skånsomt. En kabel vil med andre ord utsettes for både en sterkere mekanisk og mer langvarig elektrisk påkjenning sammenlignet med prøveobjektene studert.

⁹ANSI = American National Standards Institute.

4.1.4 PD-måling av prøveobjekter utsatt for mekanisk påkjenning og elektrisk kondisjonering

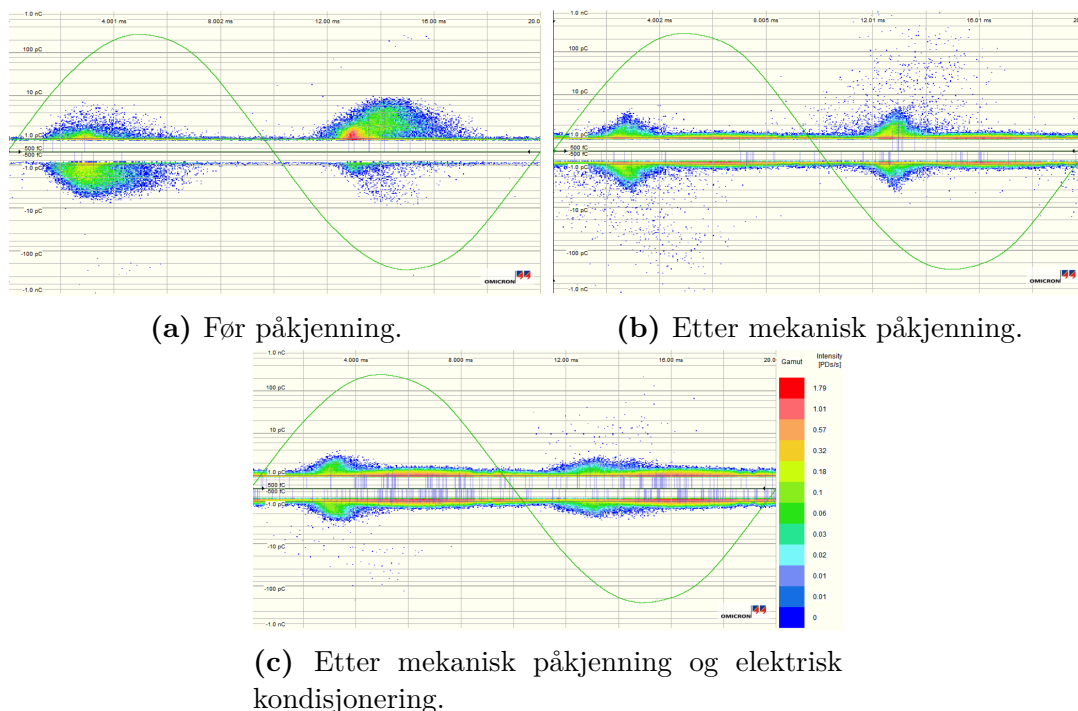
En kabel vil utsettes for hardere mekanisk belastning enn prøveobjektene benyttes. I tillegg har det kun vært kjørt korttidstesting, hvor prøveobjektene har vært spenningsatt i fire timer. Dette avviker fra en idriftsatt kabel som kan være spenningsatt i flere tiår. Det ble ikke observert PD-aktivitet som skyldes de innlagte forurensningene. Det var derfor av interesse å se om det var mulig å tenne utladninger ved å mekanisk påkjenne prøveobjekter, for så å spenningssette dem over lenger tid før PD-testing. Totalt ble tre prøveobjekter utsatt for mekanisk belastning. Objektene ble bøyd rundt et rør med diameter på 2 mm, 50 ganger til hver side, beskrevet i avsnitt 3.5.1.

Figur 4.8 viser feltstyrken ved tenn- og slukkespenning til prøveobjekt med stålpartikler. Fra figuren sees det at feltstyrken ved PDIV og PDEV var relativt like ved alle tre tester, uavhengig av både mekanisk påkjenning og elektrisk kondisjonering. Selv om prøveobjektet ble utsatt for elektrisk og mekanisk påkjenning vises hverken tegn til tidligere eller økt PD-aktivitet, se figur 4.9. Ved å sammenligne PD-plottene fra de tre testene kan det se ut til at PD-aktiviteten var størst ved testing av prøveobjektet før det ble mekanisk påkjent og elektrisk kondisjonert.



Figur 4.8: Data fra PD-testing av prøveobjekt med stålpartikler. Ved første PD-test var objektet behandlet på vanlig måte. Ved PD-testet nummer to hadde prøveobjektet blitt mekanisk belastet, og ved siste test hadde objektet blitt utsatt for både mekanisk påkjenning og elektrisk kondisjonering. Ingen markant endring av PD-aktivitet ble observert.

4.1 Måling av partielle utladninger



Figur 4.9: Samtlige plot viser PD-aktivitet ved spenningsnivå på 23 kV, som tilsvarer et elektrisk felt på 24,8 kV/mm. Størst PD-aktivitet i figur a, hvor prøveobjektet ikke hadde vært utsatt hvor hverken mekanisk påkjenning og elektrisk kondisjonering.

PEX er et mykt materiale, og ved å mekanisk belaste prøveobjektet var det tenkelig at eventuelle hulrom og sprekke-dannelser mellom innlagte partikler og omliggende isolasjon ville utvides. Det er også vist at holdfastheten reduseres kraftig når PEX-isolasjon blir mekanisk belastet[21]. PD-målingene viser ingen tegn til økt PD-aktivitet etter at objektet ble mekanisk påkjent. Dette kan tyde på at partiklene lå godt beskyttet i PEX-objektet, og at eventuelle hulrom og sprekker ikke ble utvidet. Heller ikke elektrisk aldring ga økt PD-aktivitet.

Tilsvarende testing skulle også utføres på et prøveobjekt med PE88-partikler. Prøveobjektet ble PD-testet og deretter mekanisk belastet ved å bøye det rundt ett rør. Objektet skulle deretter gjennomgå en ny PD-test for å se etter endring av PDIV og PDEV. Ved 24,9 kV, som tilsvarer feltstyrke på 27,6 kV/mm, ble det gjennomslag. Objektet hadde da vært spenningsatt i sammenhengende 57 minutter. Gjennomslaget førte til skade på epoxyen, og elektrodeoppsettet kunne derfor ikke benyttes til videre PD-testing. Skadet elektrodeoppsett kan sees i figur 4.6 i avsnitt 4.1.2.

4.2 Oksidering av polyetylen

PE-partikler ble oksidert i et ventilert varmeskap i følgende tidsintervall: 7, 22 og 88 døgn. Underveis i oksidasjonsprosessen ble partiklene undersøkt visuelt, hvor farge og form ble studert. Etter omtrent ett døgn hadde polyetylendiskene gulnet og formen var seig. Etter syv døgn i varmeskap ble PE-diskene malt opp til partikler, fargen til diskene var da rød-brun. Først etter omtrent 24 døgn hadde partiklene endret farge til svart. Etter dette ble det ikke observert forandring av synlig farge videre i oksidasjonsprosessen. Partiklene ble svarte på grunn av biprodukter som antioksidantene gir fra seg når de brytes ned.

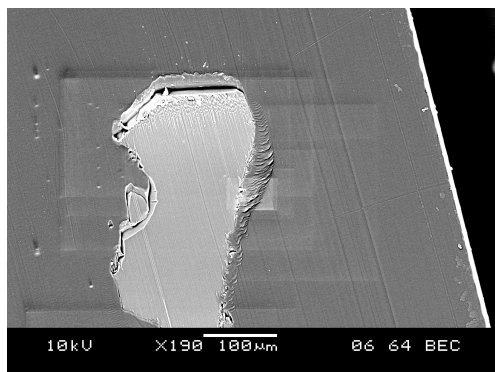
Oksidasjon vil forårsake en viss sprøhet i materialet, og partiklene ble derfor berørt med pinsett for å se om formen endret seg underveis i oksidasjonsprosessen. Fra oksidasjonsstart til omtrent to uker var formen seig. Etterhvert fikk de en mer fast form, men smuldret aldri. Partiklene som hadde oksidert i 88 døgn kunne fint berøres med pinsett uten at de mistet sin opprinnelige form, og heller ikke disse partiklene opplevdes som spesielt sprø.

4.2.1 Skanning elektronmikroskop

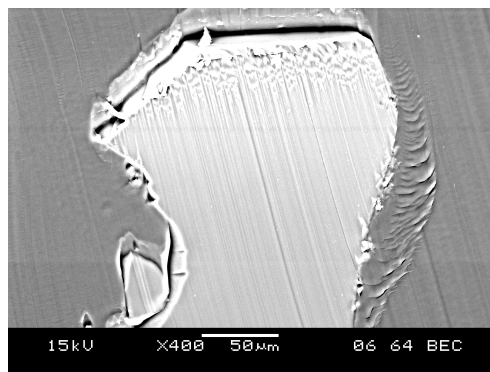
PE-partikler oksidert i to ulike tidsintervall, henholdsvis i 7 og 88 døgn, ble undersøkt i SEM (JSM-6480LV) på NanoLab. Partiklene ble støpt inn i PEX-disker og snittet ved bruk av mikrotom. Tilsammen ble fire PE7-partikler og fem PE88-partikler undersøkt, se tabell 4.1. Alle partiklene som hadde oksidert like lenge så relativt like ut. To typiske partikler av både PE7 og PE88 presenteres i figur 4.10 – 4.13, og representerer typiske karakteristika til partiklene som ble undersøkt. V_{acc} står for akselerasjonsspenning, mens spot size angir utstrekningen på elektronstrålen.

Tabell 4.1: Oversikt over partiklene som ble undersøkt i SEM.

	Antall partikler undersøkt i SEM	Figur nr.
PE7-partikler	4	4.10 og 4.11
PE88-partikler	5	4.12 og 4.13

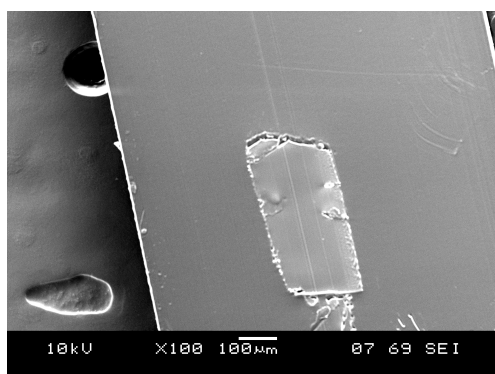


(a) V_{acc} : 10 kV, spot size: 64 nm.

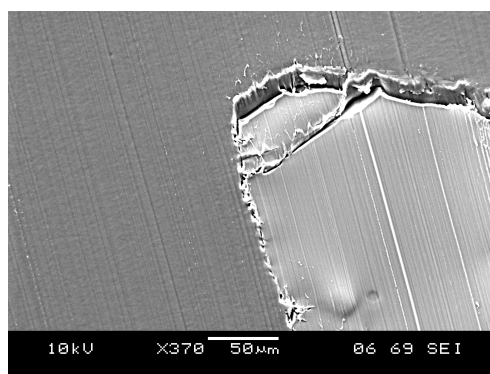


(b) V_{acc} : 15 kV, spot size: 64 nm.

Figur 4.10: PE7-partikkel undersøkt i SEM. Partikkelen så ut til å ha god heft til omliggende PEX og porøse områder ble ikke identifisert. Bildene presentert representerer typiske SEM-bilder av PE7-partiklene som ble undersøkt.



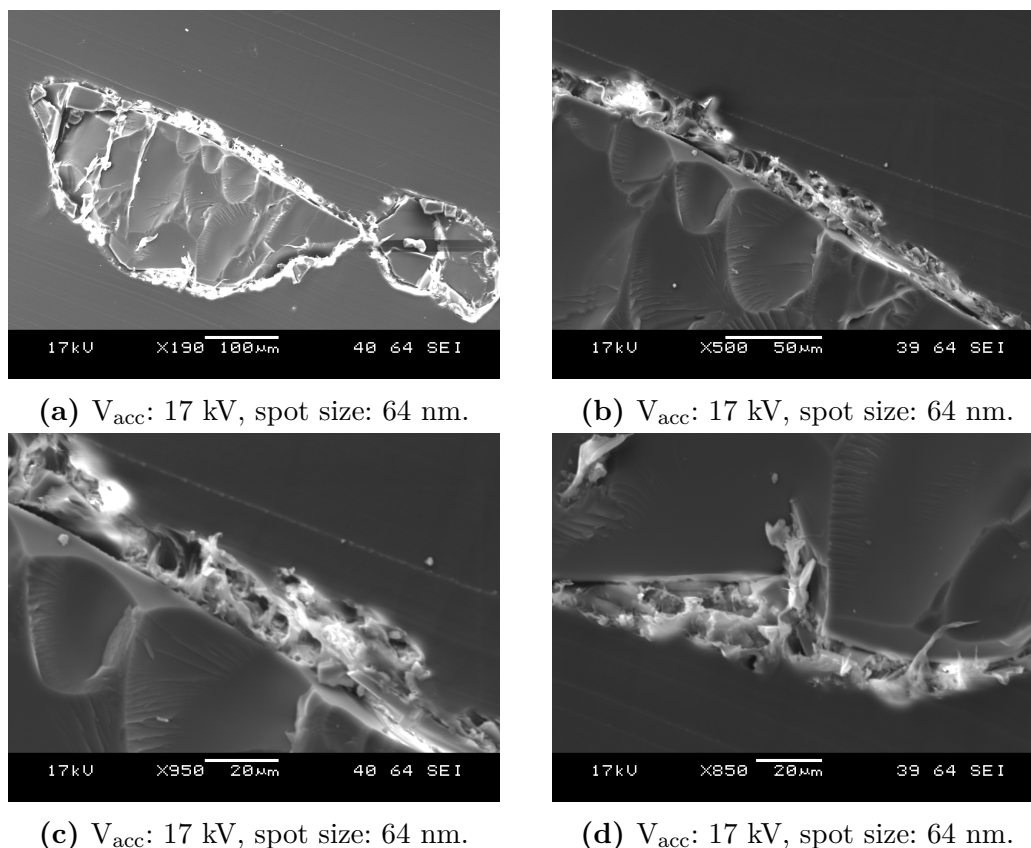
(a) V_{acc} : 10 kV, spot size: 69 nm.



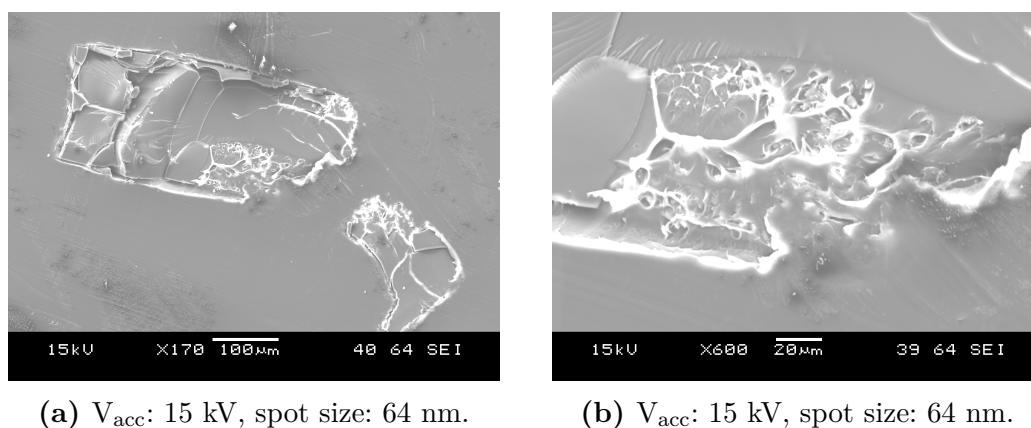
(b) V_{acc} : 10 kV, spot size: 69 nm.

Figur 4.11: PE7-partikkel undersøkt i SEM. Også denne partikkelen heftet godt med omliggende isolasjon, i likhet med PE7-partikkel vist i figur 4.10. Ingen porøse områder ble identifisert. Partikkelen representerer typiske SEM-bilder av PE7-partiklene som ble undersøkt.

4.2 Oksidering av polyetylen



Figur 4.12: PE88-partikkel undersøkt i SEM. Partikkelen hadde en ruglete overflate, og i figur b – d kan det observeres små hulrom i overgangen fra partikkel til omliggende PEX-isolasjon. Maksimal diameter på hulrom var 10 μm . Bildene ovenfor representerer typiske SEM-bilder av PE88-partiklene som ble undersøkt.



Figur 4.13: PE88-partikkel undersøkt i SEM. Øvre del av partikkelen hadde delt seg i mindre biter, og i figur b observeres det antydninger til porøse områder. Denne partikkelen hadde en jevnere overgang fra partikkel til omliggende PEX-isolasjon sammenlignet med PE88-partikkel i figur 4.12.

Ved å sammenligne bildene av PE7- og PE88-partiklene som ble studert i SEM, presentert i figur 4.10 – 4.13, kan det se ut til at PE-partiklene avhenger av oksidasjonstid. Porøse områder ble ikke observert i noen av de fire PE7-partiklene som ble undersøkt. Overgangen fra PE88-partiklene til omliggende isolasjon var langt mer ujevn og hadde små hulrom sammenlignet med PE7-partiklene.

Oksidasjon vil forårsake en viss sprøhet i materialet som bidrar til å skape porøse områder. Resultatene fra SEM-undersøkelsen viste at man ikke har klart å fremprovosere porøse områder i PE7-partiklene, men det ble observert porøse områder i PE88-partiklene. Det så også ut til at PE88-partiklene var mekanisk svekket på grunn av lenger oksidasjonstid, da overflaten ikke var like jevn som PE7-partiklene. Det kunne også sees sprekkdannelser i PE88-partiklene, og det så ut som de hadde delt seg i mindre biter og hadde mistet sin opprinnelige form.

Fra utførte PD-målinger presentert i avsnitt 4.1.2 ble det konkludert med at observert utladninger ikke skyldes de innlagte forurensningene. Det kunne derfor se ut til at de innlagte partiklene benyttet på laboratoriet heftet godt til det omliggende materialet siden hulrom og sprekkdannelser i partikkel og i overgang fra partikkel til omliggende isolasjon vil gi PD-aktivitet.

De største hulrommene hadde en diameter på 10 μm . Ved å benytte Paschenkurven[2, side 64] ble holdfastheten til hulrommet funnet til å være 23 kV/mm. For å beregne holdfastheten ble det antatt at hulrommet var fylt med luft ved 1 atm og 20°C. Det ble også antatt at det elektriske feltet i hulrommet var homogent. Prøveobjektene med PE88-partikler har vært utsatt for en feltstyrke opp til 30 kV/mm. Dette er en forenklet beregning, og ble gjort for å understreke at påtrykt feltstyrke på laboratoriet har vært høy nok til å skulle tenne utladninger i observerte hulrom.

Det kan ikke utelukkes at observerte hulrom og sprekkdannelser skyldes prøvepreparering. Derfor er det vanskelig å konkludere om resultatene fra SEM-undersøkelsene skyldes fremstillingen av prøveobjektet eller den mekaniske påkjenningen ved bruk av mikrotom. Riktignok ble samtlige partikler utsatt for identisk prøvepreparering, men partiklene kan ha respondert ulikt da deres mekaniske egenskaper kan avhenge av oksidasjonsgrad.

5 Konklusjon

Det har blitt utført PD-målinger på plane, sirkulære prøveobjekter av PEX med en diameter på 100 mm og en nominell tykkelse på 1 mm. Målinger har blitt utført på fem ulike prøveobjektkategorier: referanseobjekter, objekter med stålpartikler, og objekter med PE-partikler oksidert i henholdsvis 7, 22 og 88 døgn. PE-partikler oksidert i 7 og 88 døgn har blitt studert ved bruk av skanning elektronmikroskop (SEM).

Følgende konklusjoner kan trekkes:

- Det har ikke blitt observert utladninger som skyldes de innlagte forurensningene. Prøveobjekt med stålpartikler utsatt for mekanisk påkjenning og elektrisk kondisjonering viser hverken tegn til forekomst av utladninger ved lavere spenningsnivå eller økt PD-aktivitet.
- Forekomst av PD-aktivitet i grensesjiktet mellom prøveobjektets overflate og messingelektrodene innstøpt i epoxy gjør at dagens laboratorieoppsett bør endres. Undersøkelse av høyspentelektrode i profilometer viste en høydeforskjell på 10 – 21 μm mellom messingelektrode og epoxy, mens høydeforskjellen på jordelektroden var 5 – 10 μm . Siden epoxyen lå høyere enn messingelektrodene, ble ikke messingelektrodene liggende i direkte kontakt med pådampet elektrode på prøveobjektene og førte dermed til PD-aktivitet.
- Organiske partikler har blitt lokalisert i en 35 kV TR-PEX-kabel i USA ved hjelp av PD-måling. Det er altså mulig å observere partielle utladninger som skyldes forurensninger, selv om det ikke har blitt gjort tilsvarende funn i denne rapporten. Påkjenningene partiklene i drift har vært utsatt for er forskjellige sammenlignet med påkjenningene partiklene opplevde på laboratoriet. Partiklene lokalisert i kabelen har vært utsatt for en feltstyrke på 1,5 – 2,5 kV/mm i fem år, mens prøveobjektene med innlagte partikler har vært utsatt for en feltstyrke opp til 30 kV/mm, men i en langt kortere tidsperiode. Partikler lokalisert i kabelen var større sammenlignet med partiklene benyttet i denne oppgaven, som var i størrelsesorden 355 – 500 μm . I tillegg vil en kabel utsettes for en hardere mekanisk belastning både under produksjon og installasjon, mens benyttede prøveobjekter ble behandlet skånsomt.
- Resultatene fra SEM-undersøkelsen antyder at partiklene oksidert i 7 døgn heftet bedre til omliggende PEX-isolasjon sammenlignet med partiklene oksidert i 88 døgn. Porøse områder og hulrom i overgangen fra partikkel til isolasjon ble identifisert i partiklene oksidert i 88 døgn, hvor maksimal diameter på hulrom var 10 μm .

6 Videre arbeid

Forslag til videre arbeid:

- For å kunne observere partielle utladninger som skyldes innlagte forurensninger må dagens laboratorieoppsett endres. Nye messingelektroder innstøpt i epoxy må fremstilles. Nye elektroder bør undersøkes i profilometer før de tas i bruk for å utelukke en eventuell høydedifferanse mellom epoxy og messingelektrode. Dette for å unngå forekomst av PD-aktivitet i grensesjiktet mellom prøveobjektets overflate og elektrodeoppsettet.
- Partielle utladninger fra organiske partikler har blitt observert i en kabel i USA. Forskjeller mellom gjennomførte laboratorieforsøk og en idriftsatt kabel bør reduseres i forsøk på å gjøre tilsvarende funn under kontrollerte forhold på laboratoriet. For å få laboratorieeksperimentene tilnærmet lik en idriftsatt kabel bør objekter med kunstige forurensninger elektrisk kondisjoneres over lenger tid enn 8 døgn. I tillegg kan det være interessant å utsette objekter for mekanisk belastning, samt temperaturvariasjoner som kan oppstå i en reell kabel.
- For å undersøke om utvidet oksidasjonstid fører til en økning av porøse områder og hulrom kan det være interessant å studere PE-partikler som har oksidert lenger enn 88 døgn i SEM. I tillegg kan det være av interesse å undersøke og kategorisere oksidasjonsgrad til oksidert PE ved bruk av FTIR¹⁰.

¹⁰FTIR = Fourier Transform Infrared Spectrometry.

Referanser

- [1] Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap (DSB), “Nasjonalt risikobilde 2012,” 2012. Tilgjengelig fra http://www.dsb.no/Global/Publikasjoner/2012/Tema/NRB_2012.pdf, hentet 3.desember 2015.
- [2] E. Ildstad, *TET4160 High Voltage Insulation Materials*. Trondheim: NTNU, 2014.
- [3] Nexans, “Cables for high voltage underground power transmission,” 2009. Tilgjengelig fra http://www.nexans.de/Germany/2009/HighVoltage_EastEuro_CZ_17mar09.pdf, hentet 5.desember 2015.
- [4] S. Hvidsten, M. Vandbakk, and F. Mauseth, “Dielectric properties of organic contaminations in xlpe cable insulation,” pp. 684–687, Oct 2012.
- [5] L. Lundgaard, “PARTIELLE UTLADNINGER Begreper, måleteknikk og mulige anvendelser for tilstandskontroll,” *SINTEF Energi AS, Trondheim*, mars 1996.
- [6] J. Antonischki, U. Nilsson, and S. Gubanski, “Influence of metal inclusions on the breakdown strength of model cables,” vol. 1, pp. 283–286 vol.1, Oct 1997.
- [7] W. S. Lee, N. O. Kim, Y. H. Chung, and M.-K. Han, “Effects of metal impurities in insulation of distribution cables,” pp. 225–228, Jun 1998.
- [8] S. Hagen and E. Ildstad, “Reduction of AC-breakdown strength due to particle inclusions in XLPE cable insulation,” pp. 165–168, Nov 1993.
- [9] R. Coppard and R. Rakowski, “The influence of polymer contamination on breakdown characteristics,” pp. 2/1–211, Mar 1991.
- [10] J.-O. Bostrom, E. Marsden, R. Hampton, and U. Nilsson, “Electrical stress enhancement of contaminants in XLPE insulation used for power cables,” *Electrical Insulation Magazine, IEEE*, vol. 19, pp. 6–12, July 2003.
- [11] NEK/NK20, “Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages above 150 kV ($U_m = 170$ kV) up to 500 kV ($U_m = 550$ kV) - Test methods and requirements,” Dec 2011.
- [12] S. Hvidsten and B. Lanz. E-mail-korrespondanse med IMCORP, April 2016.
- [13] H. Smisethjell, “Prosjektoppgave: Eksperimentell metode for måling av partielle utladninger i kryssbundet polyetylen med organiske forurensninger,” 2015.
- [14] A. Barlow, “The chemistry of polyethylene insulation,” *Electrical Insulation Magazine, IEEE*, vol. 7, pp. 8–19, Jan 1991.
- [15] S. Nilsson, T. Hjertberg, and A. Smedberg, “The effect of different type of crosslinks on electrical properties in crosslinked polyethylene,” pp. 1–4, July 2010.

- [16] T. Andrews, R. Hampton, A. Smedberg, D. Wald, V. Waschk, and W. Weissenberg, "The role of degassing in XLPE power cable manufacture," *Electrical Insulation Magazine, IEEE*, vol. 22, pp. 5–16, Nov 2006.
- [17] E. Ildstad, *TET4195 High Voltage Equipment*. Trondheim: NTNU, 2009.
- [18] L. Dissado and J. Fothergill, *Electrical Degradation and Breakdown in Polymers*. IEE materials & devices series, P. Peregrinus, 1992.
- [19] L. A. Dissado and J. Fothergill, *Electrical Degradation and Breakdown in Polymers*. United Kingdom: IET Materials and Devices Series 9, 2008.
- [20] Billingham, N.C., *Materials Science and Technology - Degradation and Stabilization of Polymers*. United Kingdom: Wiley-VCH Verlag GmbH and Co. KGaA, 2006.
- [21] E. Ildstad and S. T. Hagen, "Electrical treeing and breakdown of mechanically strained xlpe cable insulation," in *Electrical Insulation, Conference Record of the 1992 IEEE International Symposium on*, pp. 135–139, Jun 1992.
- [22] E. Doedens, A. Johansson, M. Jarvid, S. Nilsson, M. Bengtsson, and J. Kjellqvist, "Effects of inclusions of oxidized particles in XLPE on treeing phenomena," pp. 597–600, Oct 2012.
- [23] S. Hamid, "Handbook of polymer degradation," Dec 2000.
- [24] W. Linzey, N. H. Turner, A. Bruning, and B. Bernstein, "Correlation of the thermal history and level of oxidation with field failure in a primary distribution cable study," vol. 1, June 1998.
- [25] S. Boggs and J. Densley, "Fundamentals of partial discharge in the context of field cable testing," *Electrical Insulation Magazine, IEEE*, vol. 16, pp. 13–18, Sept 2000.
- [26] E. Lemke, "guide for partial discharge measurements in compliance to IEC 60270," pp. 61–67, December 2008.
- [27] S. Hvidsten, "Tilstandskontroll av kabel- og transformatoranlegg. Del 1: Kabel," 2012. PowerPoint-presentasjon, tilgjengelig fra <http://www.ifea.no/wp-content/uploads/2012/02/SHvidsten.pdf>, hentet 6.oktober 2015.
- [28] W. L. Hawkins, "Thermal and oxidative degradation of polymers," *Polymer Engineering and Science*, vol. 4, no. 3, pp. 187–192, 1964.
- [29] J.-P. Crine, S. Haridoss, K. Cole, A. Bulinski, R. Densley, and S. Bamji, "Oxidation and thermal resistance of HMW-PE and XLPE HV," pp. 219–224, June 1988.
- [30] S. Hamid, "SEM - Scanning Electron Microscope A to Z." Tilgjengelig fra http://www.jeol.co.jp/en/applications/pdf/sm/sem_atoz_all.pdf, hentet 3.april 2016.

REFERANSER

- [31] A. D149-09, "Standard Test Method for Dielectric Breakdown Voltage and Dielectric Strength of Solid Electrical Insulating Materials at Commercial Power Frequencies," 2013.
- [32] H. Faremo, "The EFI Test Method - Wet ageing of High Voltage Materials," *EFI SINTEF Group*, 1994.
- [33] ANSI/ICEA S-97-682-2007, "Standard for Utility Shielded Power Cables Rated 5 Through 46 kV," 2007.

A Vedlegg A - Utstyrliste

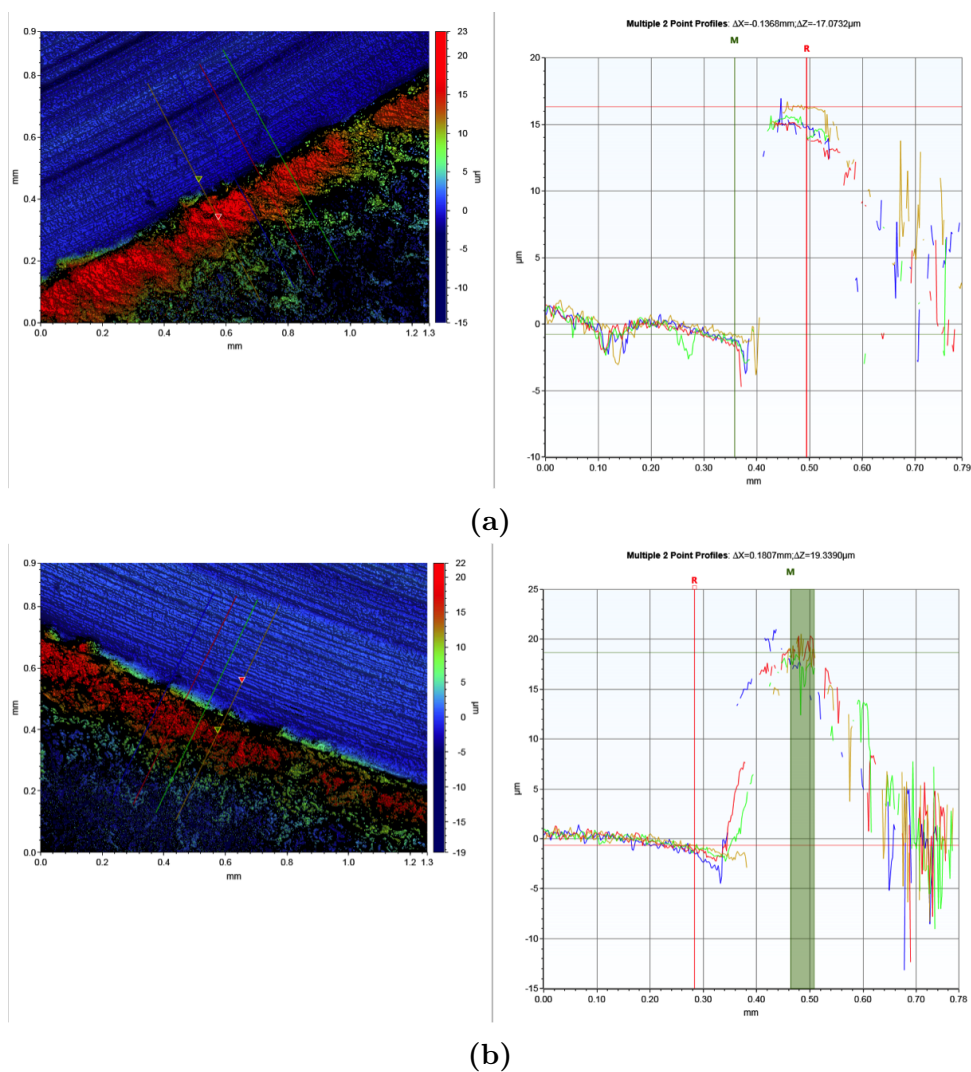
Tabell A.1: Liste over komponenter benyttet på laboratoriet.

Komponent	Registreringsnummer
Styrepult	B01-0756
Transformator, parallellkoblet	B01-0743
Trykktank	P05-0092-02
Koblingskondensator	SEfAS K03-0127
Datalogger	G05-0138
OMICRON fiberoptikk, buss	H02-0182
OMICRON signalmåler	H02-0133-01
OMICRON måleimpedans	H02-0132-08

B Vedlegg B - Elektroder undersøkt i profilometer

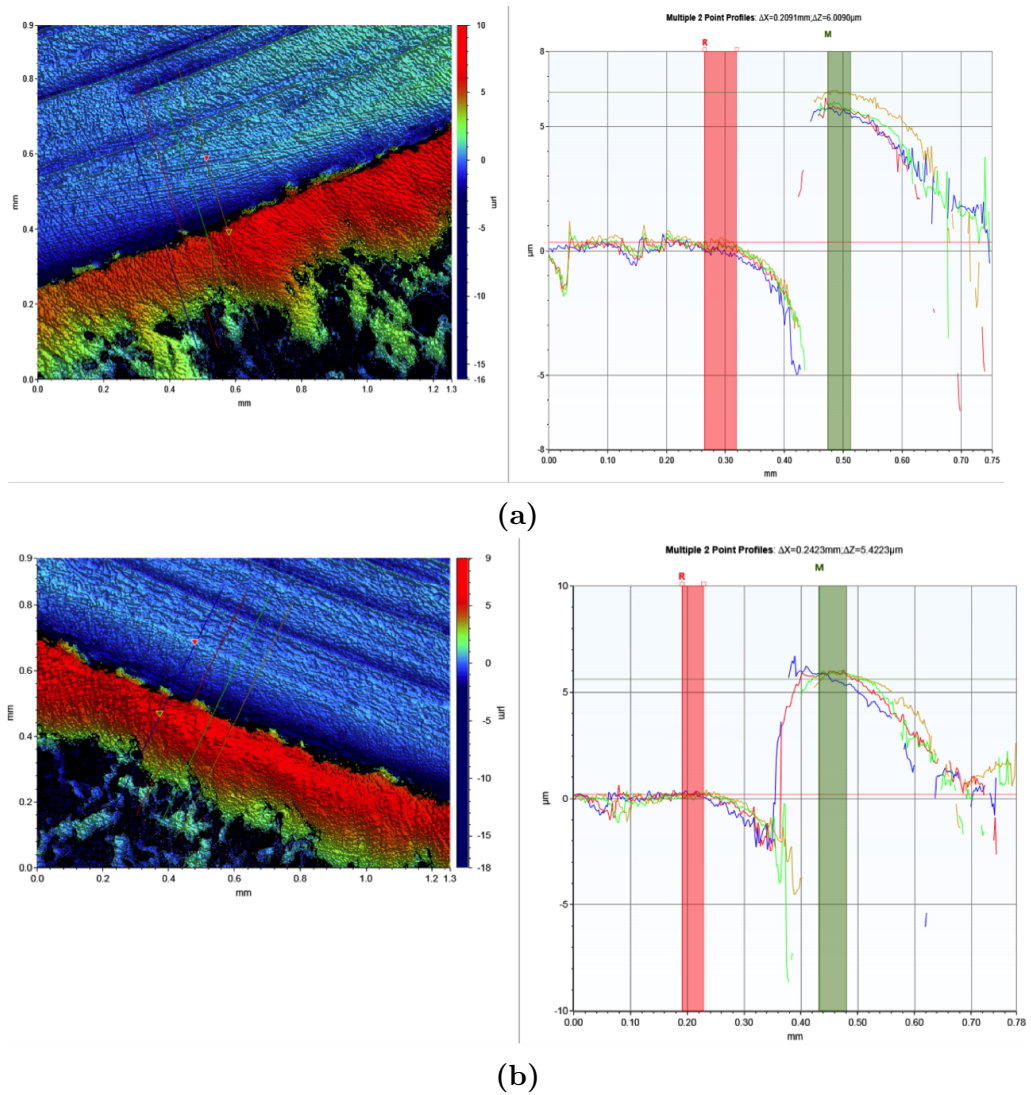
Profilometerundersøkelsen ble gjort av Jorunn Hølto ved SINTEF Energi.

B.1 Høyspentelektrode



Figur B.1: Høyspentelektrode støpt i epoxy ble undersøkt i profilometer. Resultatene viste en høydeforskjell på 10 – 21 μm mellom messingelektrode og epoxy.

B.2 Jordelektrode



Figur B.2: Jordelektrode støpt i epoxy ble undersøkt i profilometer. Resultatene viste en høydeforskjell på 5 – 10 μm mellom messingelektrode og epoxy.