



Forbedring av kohesjon mellom partikkelforurensning og PEX-isolasjon

Thomas Fjeld Johannessen

Master of Science in Electric Power Engineering
Innlevert: Juni 2012
Hovedveileder: Frank Mauseth, ELKRAFT

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Institutt for elkraftteknikk

Oppgavetekst

There is a push towards higher voltages to reduce the losses of power transmission by high voltage cables. At the same time the amount of insulation needed should be kept low to reduce cost. Increased voltage without increasing the insulation thickness increases the electric field in the insulation (typically being XLPE). The increased electric field may result in premature failure of the cable through electrical treeing. To ensure high reliability of power cables the inception of electrical trees in the insulation should be avoided. This is of special importance for subsea cables where the cost of repair is very high.

Electrical trees typically originate from protrusions at the semiconductor-insulator interface, or from contaminants/particles in the insulation. Such protrusions and contaminants in the insulation reduce the theoretical intrinsic breakdown strength of the insulation, and therefore limit the safe voltage level of cables. This is well known in the industry, and thus super clean materials are used, and special care is taken during production, to limit the number of contaminants in the cable insulation. In spite of this effort it is impossible to completely avoid contaminations in the finished cable, as the cables are typically extruded in lengths of several kilometers. An alternative approach is to make the insulation more reliable through improved defect tolerance of the insulation. Experiments with needles pressed into polymeric insulation shows that the interface between needles/insulation is very important. Poor contact between the needle and the polymer may result in partial discharges in voids near the needle apex leading to inception of an electrical tree. Similar processes are believed to occur in the polymer at contaminants/particles where the incompatibility of the particle with the polymer matrix may result in micro voids where partial discharges can occur. It is the goal of this project to modify the interface between contaminants and polymer in order to increase the cohesion between the contaminants and the polymer matrix.

The project is mainly experimental. The project work will be carried out on Rogowski shaped test objects with and without contamination particles (oxidized XLPE particles) with modified surfaces. Laboratory experiments will be performed using AC voltage.

Oppgave gitt: 30. januar 2012

Hovedveileder: Frank Mauseth, Institutt for Elkraftteknikk

Medveileder: Øystein L. G. Hestad, SINTEF Energi AS

Forord

Denne oppgaven er en avsluttende masteroppgave ved Norges Teknisk-Naturvitenskaplige Universitet innen studiet: MSc in Electric Power Engineering.

Arbeidet er utført ved Instituttet for Elkraftteknikk våren 2012 og er gitt på bakgrunn av et samarbeid mellom SINTEF Energi AS og NTNU.

Jeg vil takke hovedveileder Førsteamanuensis Frank Mausest ved Institutt for Elkraftteknikk, NTNU, samt medveileder Øystein Hestad ved SINTEF Energi AS for utrettelig hjelp gjennom hele prosjektperioden. Det har alltid vært mulig å søke hjelp både med det teoretiske og det praktiske laboratoriearbeidet. I tillegg vil jeg takke for hjelp med skisseringen av testobjektene og generell bruk av redigeringsprogram for vektorgrafikk.

Jeg vil og takke Hans Helmer Sæternes ved SINTEF Energi AS og Torbjørn Ve ved NTNU for god hjelp med det praktiske laboratoriearbeidet.

Sammendrag

Det er ønskelig å øke driftsspenningen for krafttransmisjon ved bruk av høyspenningskabler, da en høyere driftsspenning vil gi lavere tap. Om man beholder samme tykkelse på isolasjonen og samtidig øker driftsspenningen, vil også det elektriske feltet i isolasjonen øke. Et økt felt vil gi en økt belastning på isolasjonen og kan føre til fremskyndet aldring og sammenbrudd. Det er flere faktorer som påvirker aldringen og dermed levetiden i et isolasjonssystem basert på polymerisolasjon (som her PEX) [1]. De viktigste faktorene under normal drift er forurensninger og urenheter. Dette er velkjente problemer og det tas strenge forhåndsregler under produksjon av slike isolasjonssystemer. På tross av dette er det praktisk umulig å unngå forurensninger når det produseres kabelisolasjon i store mengder.

En annen angrepsvinkel er derfor å øke isolasjonssystemets toleranse ovenfor slike forurensninger. En måte å øke toleransen på er å sørge for god kontakt mellom isolasjonsmaterialet og en eventuell forurensning. Det er forsøkt oppnådd i dette prosjektet ved å øke kohesjonen mellom isolasjonsmaterialet og forurensningen ved å tilføre et heftemiddel. Dette er gjort ved å produsere testobjekter med tilsatt partikkelforurensning, for så å teste holdfastheten. Testobjektene har blitt tilsatt partikler behandlet på fire forskjellige måter:

- 1) Referanse – Testobjekt uten tilsatte partikler.
- 2) Ubehandlet – Testobjekt tilsatt ubehandlede partikler.
- 3) Heftemiddel – Testobjekt tilsatt partikler behandlet med nanokompositter.
- 4) Slippmiddel – Testobjekt tilsatt partikler behandlet med Chemlease PMR-90.

Da det fra tidligere forsøk var kjent at denne typen testobjekt var hyppig utsatt for en defekt, ble laboratorie-arbeidet innledet med feilsøking av testobjektene [11]. Feilkilden viste seg å være vanskelig å finne, og nesten hele prosjektperioden ble benyttet på feilsøking. Under feilsøkingen ble flere av produksjonsparameterne variert, uten store forskjeller på resultatet. Defektene var stort sett av samme karakter uansett hvilke parametere som ble forandret.

Det kan konkluderes med at ujevnheter i grenseoverflaten mellom indre halvleder og isolasjonsmaterialet medfører gjennomslag ved langt lavere påtrykt spenning enn det isolasjonssystemet er designet for å motstå. Når det gjelder feilkilder er det ennå ikke mulig å konkludere med noe, selv om høy mekanisk belastning på overflaten ved produksjon av råkopper virker som en sannsynlig feilkilde. Dette kommer høyst sannsynlig fra små ujevnheter som riper eller hakk i overflaten på støpeformene som følge av slitasje.

Den resterende tiden ble benyttet til måling av PD, men det ble ikke nok tid til å gjennomføre tilstrekkelig med målinger. Det er og få testresultater fra de målingene som ble gjennomført, sannsynligvis grunnet de samme defektene som forhindrer måling av gjennomslagspenning. Det kan derfor ikke konkluderes med om heftemiddelet har noen effekt basert på PD målingene.

Abstract

There is a push towards higher voltages to reduce the losses of power transmission by high voltage cables. At the same time the amount of insulation needed should be kept low to reduce cost. Increased voltage without increasing the insulation thickness increases the electric field in the insulation. The increased electric field may result in premature failure of the cable through electrical treeing. There are several factors that affect the ageing and hence the lifetime of an insulation system based on polymeric insulation (here, XLPE) [1]. One of the most important factors during normal operation is contaminants/particles in the insulation. These are well known problems and strict precautions are being taken during the production. Despite this, it is practically impossible to avoid contaminants when large amounts of insulation are produced.

Another angle of attack is therefore to increase the tolerance of the insulation system when it comes to contaminants. One way to increase the tolerance is to insure good contact between the insulation material and the contaminants. In this project the goal is to increase the cohesion between the insulation material and the contaminant, by using an adhesive agent. This is done by producing test objects with artificial particle contaminants added, before testing them. The test objects are produced in four different ways:

- 1) Reference – Test object without added particles.
- 2) Untreated – Test object added untreated particles.
- 3) Adhesive agent – Test object added particles treated with nano composites.
- 4) Release agent – Test object added particles treated with Chemlease PMR-90.

Earlier research has unveiled that a defect often occur in this type of test objects, the laboratory work was therefore initiated with troubleshooting of the production of test objects [11]. The source of error proved difficult to find, and almost the entire project period where spent on this. During the troubleshooting several of the production parameters where adjusted, without having any significant impact on the final result. The defects where mainly of the same character, regardless of which parameters were changed.

It can be concluded that the irregularities found in the boundary between the inner surface of the semiconductor and the insulation material results in a breakdown at a much lower applied voltage than the insulation system normally would withstand. When it comes to the source of error it is not possible to reach a conclusion, however high mechanical stress on the pre-shaped Rogowski shaped object during production seems like a likely source. This is most likely the result of small irregularities like scratches and dents on the surface of the molds as a result of wear after many years of use.

The remainder of the project time was used measuring PD, however it was not sufficient time left to do an adequate amount of measurements. In addition the results from the measurements carried out were inconclusive, most likely due to the same defects as mentioned earlier. Therefore a conclusion could not be made, based on the PD measurements.

Innhold

1 Innledning.....	1
2 Teori	3
2.1 PEX.....	3
2.2 Halvleder	3
2.3 Partielle utladninger.....	4
2.3.1 Indre utladninger.....	4
2.3.2 Overflateutladninger.....	8
2.3.3 Koronautladninger	8
2.4 Rogowskiprofil.....	9
2.5 Partikkelbehandling.....	10
3 Metode.....	11
3.1 Testobjekt.....	11
3.1.1 Ekstrudering av PE.....	11
3.1.2 Støping av råkopp.....	12
3.1.3 PE-plate	13
3.1.4 Valsing av halvleder.....	14
3.1.5 Halvleder	15
3.1.6 Halvleder med aluminiumelektrode	16
3.1.7 Sammenstilling av Rogowski-kopp.....	17
3.1.8 Partikkelbehandling.....	19
3.2 Testoppsett	20
3.2.1 Måling av gjennomslagsspennning.....	20
3.2.2 Måling av partielle utladninger	22
4 Resultater	25
4.1 Feilsøking.....	25
4.1.1 Ny type indre halvleder (0,6 mm)	26
4.1.2 Ny type indre halvleder (0,5 mm)	34
4.1.3 Justering av temperaturinstillinger	35
4.1.4 Justering av tykkelse på PE-plate	37
4.1.5 Justering av total isolasjonstykkelse	39
4.1.6 Nye PE-råkopper.....	42
4.2 Måling av partielle utladninger	45
5 Diskusjon	47

5.1 Feilsøking.....	47
5.2 Måling av partielle utladninger	48
6 Konklusjon.....	49
6.1 Feilsøking.....	49
6.2 Måling av partielle utladninger	49
7 Forslag til videre arbeid.....	51
8 Referanser	53
9 Vedlegg.....	55
Vedlegg A – Plassering av partikler	55
Vedlegg B – Utstysliste.....	56
Vedlegg C – Mikroskopanalyse.....	57
Vedlegg D – Resultater fra feilsøking	59
Vedlegg E – Resultater fra PD målinger	62

1 Innledning

Det er ønskelig å øke driftsspenningen for krafttransmisjon ved bruk av høyspenningskabler, da en høyere driftsspenning vil gi lavere tap. Men om dette skulle bety en stor økning i mengde isolasjon, ville det gå utover den økonomiske gevinsten ved et redusert tap. Om man beholder samme tykkelse på isolasjonen og samtidig øker driftsspenningen, vil også det elektriske feltet i isolasjonen øke. Et økt felt vil gi en økt belastning på isolasjonen og kan føre til fremskyndet aldring og sammenbrudd.

Det er flere faktorer som påvirker aldringen og dermed levetiden i et isolasjonssystem basert på fast isolasjon (som her PEX) [1]. De viktigste faktorene under normal drift er forurensninger og urenheter. Mer spesifikt kan de vanligste og mest skadelige av disse oppsummeres som:

- Hulrom
- Partikler innesluttet i isolasjonsmaterialet
- Overgang mellom de forskjellige materialene i systemet
- Skarpe punkter på elektrodene

Dette er velkjente problemer og det tas strenge forhåndsregler under produksjon av slike isolasjonssystemer. På tross av dette er det praktisk umulig å unngå forurensninger når det produseres kabelisolasjon i store mengder.

En annen angrepsvinkel er derfor å øke isolasjonssystemets toleranse ovenfor denne typen forurensninger. En måte å øke toleransen på er å sørge for god kontakt mellom isolasjonsmaterialet og en eventuell forurensning. Det er forsøkt oppnådd i dette prosjektet ved å øke kohesjonen mellom isolasjonsmaterialet og forurensningen ved å tilføre et heftemiddel.

Dette er gjort ved å produsere testobjekter med tilsatt partikkelforurensning, for så å teste holdfastheten. Forsøkene som er gjort i prosjektet er begrenset til å måle gjennomslagsspenning og partielle utladninger.

2 Teori

I dette kapitlet er det sett nærmere på noen av de viktigste sammenhengene mellom partikkelforurensninger og aldringsmekanismer, samt materialene og behandlingen av partiklene som er brukt i forsøkene.

2.1 PEX

PEX er polyetylen (PE) som er blitt kryssbundet. Det finnes flere metoder for å kryssbinde PE, metoden som er benyttet i forsøket er ved bruk av et organisk peroksid. Dette er den mest brukte metoden for å kryssbinde PE. Det organiske peroksidet tilsettes polyetylenet før ekstrudering. Etter ekstrudering varmes materialet opp til 170 °C under trykk, og materialet kryssbindes [2].

Formålet med kryssbindingen er å gjøre isolasjonsmaterialet egnet for høyere driftstemperatur slik at kabelen kan lede en høyere strøm. Andre egenskaper som permittivitet og resistivitet holder seg uforandret. Noen av egenskapene til PE og PEX er vist i Tabell 2-1.

Tabell 2-1: Materialeegenskaper for PE og PEX [1].

Egenskap	PE	PEX
Relativ permittivitet (20 °C)	2,3	2,3
Tan δ (20 °C)	0,0002	0,0004
Resistivitet [Ωcm]	10^{16}	10^{16}
Maks driftstemperatur [°C]	65	90
Kortslutningstemperatur [°C]	125	250

PEX er undersøkt i dette forsøket da det er det dominerende isolasjonsmaterialet for AC spenningsnivåer opp til og med 300 kV.

2.2 Halvleder

En halvleder er et materiale med lav elektrisk ledeevne, som størrelsesmessig ligger mellom en leder og en isolator. Konduktiviteten ligger rundt $10^5 - 10^{10}$ S/m. En (typisk) kraftkabel med PEX isolasjon har en indre og en ytre halvleder. Hensikten med denne konfigurasjonen er å sikre en glatt overgang mellom isolasjon og leder/jord, og dermed unngå lokale feltforsterkninger [3]. Et jevnt fordelt felt er ønskelig da lokale feltforsterkninger vil kunne gi gjennomslag ved langt lavere spenningsnivå enn det testobjektene er designet for å motstå.

2.3 Partielle utladninger

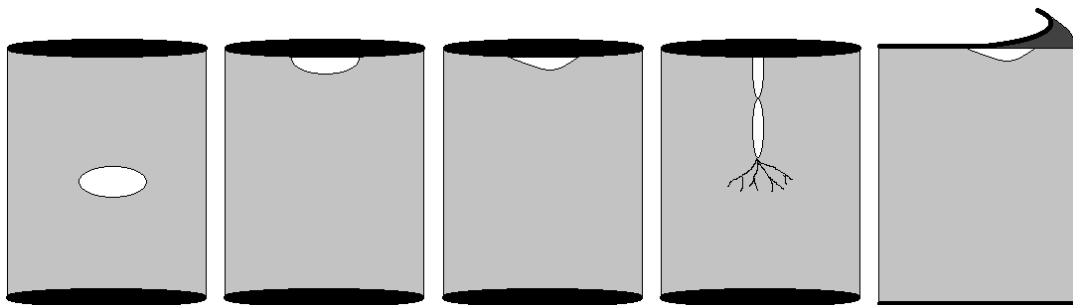
Partielle utladninger er en av de viktigste feilkildene i faste isolasjonssystem. Begrepet partielle utladninger betyr at en del av isolasjonssystemet bryter elektrisk sammen, uten at det skapes elektrisk kontakt mellom elektrodene. I fast isolasjon vil partielle utladninger over tid bryte ned isolasjonsmaterialet og føre til gjennomslag i isolasjonen.

Partielle utladninger skiller gjerne i tre ulike hovedtyper [4]:

- 1) Indre utladninger
- 2) Overflateutladninger
- 3) Koronautladninger

2.3.1 Indre utladninger

Indre utladninger kalles også hulromsutladninger, og forekommer i hulrom som dannes i faste eller flytende isolasjonsmaterialer. Hulrommene vil være fylt med en gass, gjerne luft (i faste isolasjonsmaterialer kan et hulrom og være fylt med en væske) [4]. Noen eksempler på hulrom som kan føre til indre utladninger er vist i Figur 2-1.



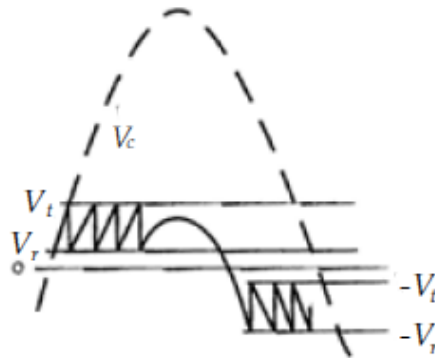
Figur 2-1: Ulike typer indre utladninger, a) hulrom innesluttet i isolasjonsmaterialet, b) hulrom i grenseoverflaten mot elektrode, c) hulrom i grenseoverflate mot elektrode (uten feste), d) hulrom initiert av elektrisk tre, e) hulrom i grenseoverflate mellom to materialer ved et langsgående felt [4].

Når kabelisolasjon av polymer-materiale produseres er det meget vanskelig å unngå at små partikler legger seg inne i isolasjonssystemet. Disse partikkelene trenger ikke nødvendigvis å bli totalt innesluttet av isolasjonsmaterialet, det vil i mange tilfeller dannes et hulrom mellom partikkeloverflaten og isolasjonsmaterialet. Hulrommet vil ha en lavere permittivitet enn det omsluttende isolasjonsmaterialet og vil derfor bli utsatt for en feltforsterkning [5]. Om et eventuelt hulrom fylt med luft har en sfærisk form og en liten diameter i forhold til avstanden mellom elektrodene, kan det elektriske feltet over hulrommet beskrives med ligning 2-1 [1]:

$$E_h = \frac{3\varepsilon_r}{1 + 2\varepsilon_r} \cdot E \quad (2-1)$$

Der E_h representerer feltstyrken over hulrommet, ε_r er den relative permittiviteten til isolasjonsmaterialet og E er den påtrykte feltstyrken som ville vært over isolasjonsmaterialet om det ikke var et hulrom tilstede. Tallet 1 representerer permittiviteten til luft. Om den relative permittiviteten til isolasjonsmaterialet er høyere enn permittiviteten til luft ($\varepsilon_r > 1$), vil det elektriske feltet i hulrommet være høyere enn i isolasjonen (feltforsterkning).

PEX har en relativ permittivitet $\varepsilon_r = 2.3$, som gir et felt over hulrommet som er 1,23 ganger høyere enn det påtrykte feltet. Dette gir stor sannsynlighet for en utladning da feltstyrken som oftest er dimensjonert for isolasjonsmaterialet mens gassen i hulrommet som regel har en mye lavere holdfasthet.



Figur 2-2: Spenning over hulrom [4].

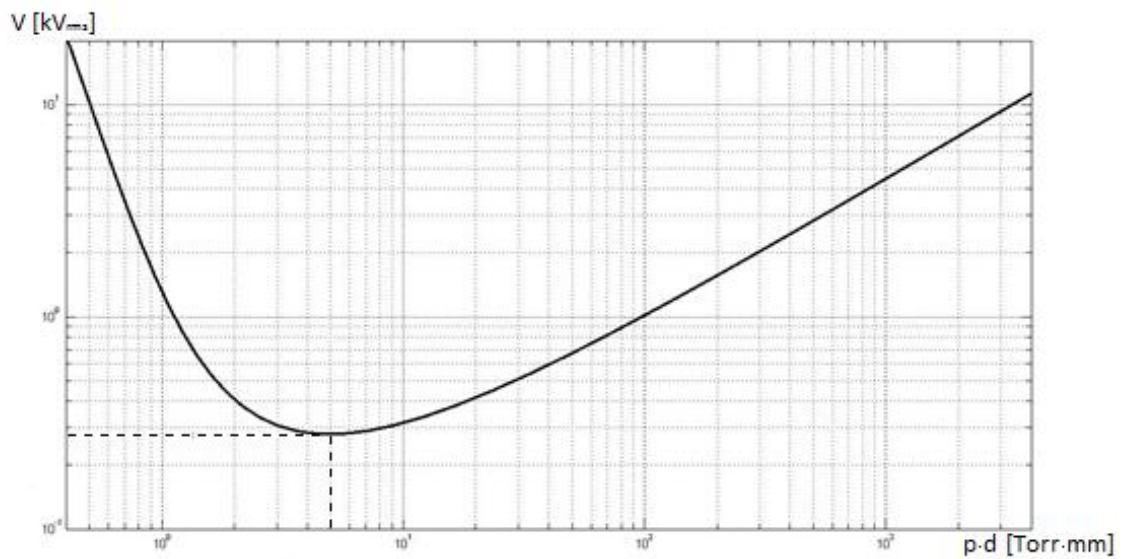
Figur 2-2 viser spenningen over hulrommet i løpet av en halvperiode. Spenningen V_c over hulrommet når tennspenningen V_t og det blir en utladning, spenningen faller så ned til en restspenning V_r , før resultantspenningen igjen stiger til V_t og en ny utladning finner sted [4].

Om spenningen over hulrommet gradvis økes vil man etter hvert nå et kritisk spenningsnivå der de første partielle utladningene finner sted, dette kalles begynnelsespenningen. Om man så senker spenningen til et nivå under begynnelsespenningen vil man fortsatt ha utladninger som en følge av spenningsforskyvingen over hulrommet. Utladningene vil opphøre først ved et lavere spenningsnivå som kalles slukkespenningen [6].

Ligning 2-1 beskriver feltstyrken over hulrommet, trykket i og størrelsen på hulrommet er andre faktorer som påvirker gjennomslagsspenningen. Sammenhengen mellom disse er beskrevet ved Paschens lov [1]:

$$U = f(p \cdot d) \quad (2-2)$$

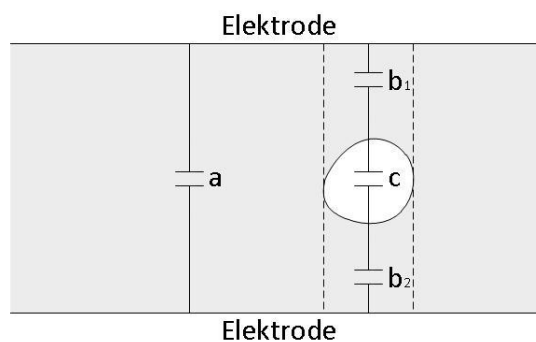
Paschens lov sier at for et hulrom i et homogent felt, ved en gitt temperatur er gjennomslagsspenningen en funksjon av trykket p i og avstanden d over hulrommet.



Figur 2-3: Paschens kurve for luft [4].

Figur 2-3 viser Paschens kurve for luft, og hvordan gjennomslagsspenningen forandrer seg med produktet av avstand og trykk. Kurvens karakteristikk lar seg best forklare om man ser for seg et hulrom med en fast avstand. Til venstre for kurvens minimum synker trykket og det trengs en høyere spenning for å få utladning. Dette er fordi det er færre gassmolekyler et elektron kan kollidere med for å oppnå ionisering. Kurvens minimum kalles også Paschens minimum og i dette punktet er trykket slik at det kreves minst spenning for å få utladning. Til høyre for kurvens minimum stiger trykket og spenningen som trengs for å få utladning øker. Dette er fordi mengden gassmolekyler øker noe som riktig nok vil gi flere kollisjoner, men elektronene når ikke tilstrekkelig høy fart for å oppnå ioniseringen som trengs for å få utladning [1].

For å undersøke hulromutladningene nærmere kan man benytte den såkalte “abc-ekvivalenten”. Figur 2-4 viser en skjematisk skisse av kapasitansene i et isolasjonsmateriale mellom to elektroder med et tilnærmet sfærisk hulrom.

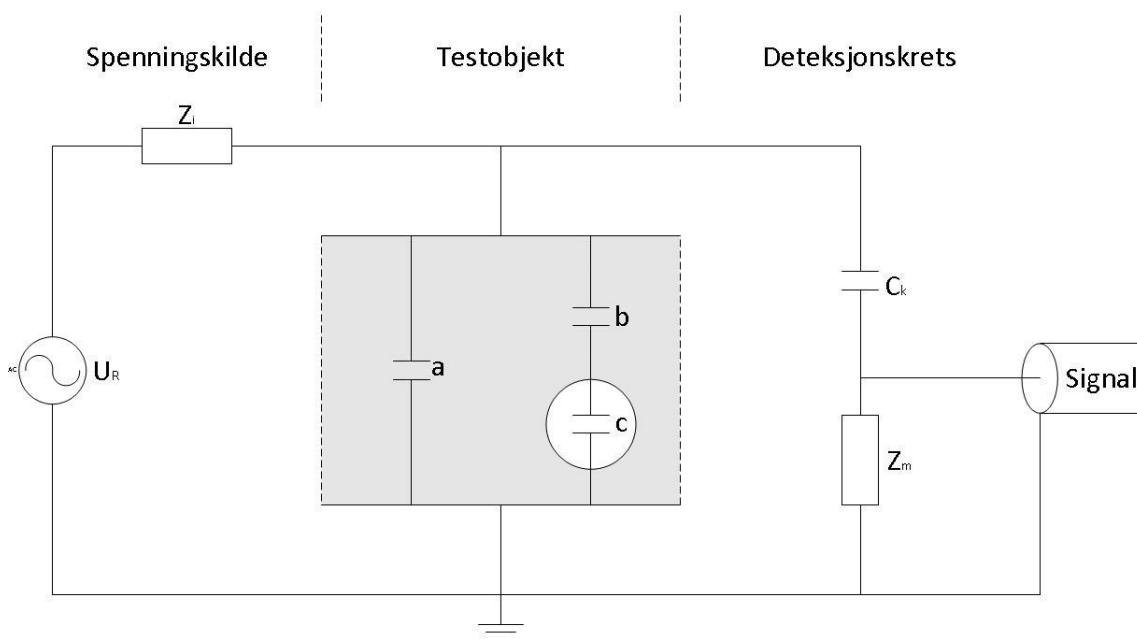


Figur 2-4: Skjematisk skisse av “abc-ekvivalenten” [1].

“abc-ekvivalenten” representerer kapasitansene i materialet. c representerer kapasitansen i hulrommet, b_1 og b_2 representerer kapasitansen til volumet av isolasjonsmaterialet som er direkte over og under hulrommet (i serie med hulrommet) mens a representerer kapasitansen til resten av isolasjonsmaterialet (i parallell med hulrommet). Siden b_1 , c og b_2 er i serie kan b_1 og b_2 forenkles til en kapasitans b . Basert på dette kan følgende antas [1]:

$$b < c \quad \text{og} \quad c \ll a \quad (2-3)$$

Figur 2-5 viser en skjematisk skisse av et oppsett for måling av partielle utladninger, med et testobjekt representert med “abc-ekvivalenten”.



Figur 2-5: Skjematisk skisse av oppsett for måling av partielle utladninger [6].

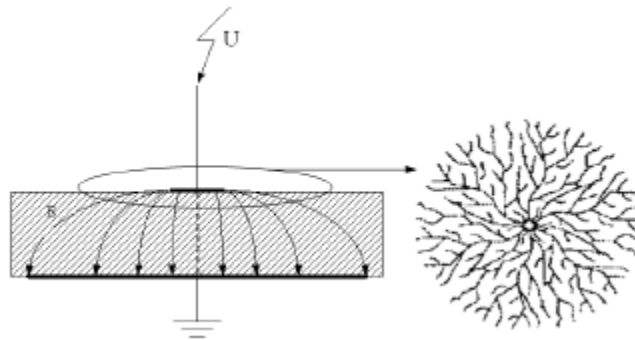
Dersom en stor kondensator kobles i parallell med testobjektet, vil denne levere en strøm til testobjektet for å utligne spenningsforskjellen (ΔU) som oppstår ved en utladning. Denne kondensatoren kalles koplingskondensator (C_k) og må minst ha like stor kapasitans som testobjektet, helst større ($C_k \geq a$). Som en følge av dette vil en liten transient strøm (Δi) sirkulere i den kapasive kretsen. Den transiente strømmen (Δi) kan måles i deteksjonskretsen over en måleimpedans (Z_m). Basert på antagelsene gjort i Formel 2-3 og kravet $C_k \geq a$, er det mulig å beregne den tilsynelatende utladningen i testobjektet ved å integrere den transiente strømmen (Δi):

$$Q_{\text{tilsynelatende}} = \int \Delta i \cdot dt = \Delta U \cdot a \quad (2-4)$$

Det som måles er altså ikke den virkelige ladningen i hulrommet, men ladningen som induseres over testobjektet. Grunnen til at det ikke er mulig å måle den virkelige ladningen er at testobjektets egen kapasitans (a) er parallellkoblet med hulrommet og koblingskondensatoren (C_k), og derfor er med å begrense strømmen som går i deteksjonskretsen [6].

2.3.2 Overflateutladninger

Overflateutladninger kan forekomme langs grenseflaten til isolasjonsmateriale dersom et tilstrekkelig sterk tangentielt felt er tilstede [4].



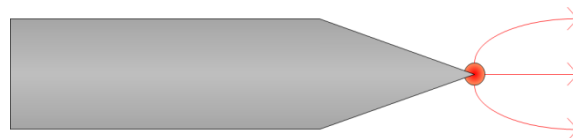
Figur 2-6: Venstre: høyt elektrisk felt fører til partielle utladninger, Høyre: typisk mønster som følge av overflateutladninger [7].

Ved et tilstrekkelig høyt felt vil utladninger forekomme langs overflaten til isolasjonsmaterialet. Utladningene som forekommer vil bevege seg ut fra elektroden i et sirkulært karakteristisk mønster som kalles Lichtenbergfigurer. Dette er illustrert Figur 2-6.

Overflateutladninger finnes typisk ved en stresskonus i en kabelskjøt eller terminering og er ikke et aktuelt tema i forsøkene som er utført her.

2.3.3 Koronautladninger

Rundt skarpe metalliske kanter for eksempel tilkoblingspunkter i et gassisolert system vil det elektriske feltet få en lokal forsterkning. Om feltet blir tilstrekkelig sterkt vil luften rundt ioniseres og det kan forekomme koronautladninger [4], illustrert i Figur 2-7.

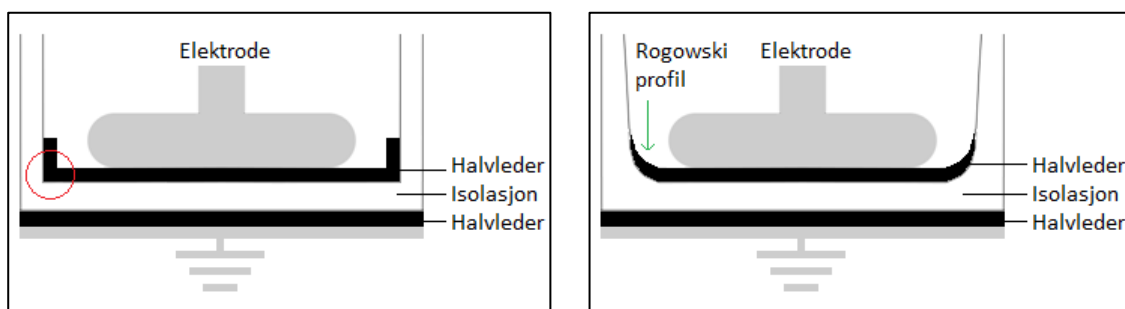


Figur 2-7: Høyt elektrisk felt ved en skarp metallisk kant fører til koronautladninger [8].

Koronautladninger kan reduseres ved bruk av for eksempel koronaringer som plasseres rundt det utsatte området. I forsøkene utført her er ikke koronautladninger et betydelig problem, men det er allikevel tatt i bruk en korona ring rundt tilkoblingspunktet til elektroden.

2.4 Rogowskiprofil

Venstre del av Figur 2-8 viser et isolasjonssystem med indre halvleder, isolasjon og ytre halvleder. Om en spenning hadde blitt påtrykt over dette systemet ville det fort fått en feltforsterkning innenfor den røde ringen på grunn av den skarpe formen på overgangen mellom halvleder og isolasjon. Dette vil føre til at isolasjonen i dette området får en økt elektrisk påkjenning.



Figur 2-8: Snitt av isolasjonssystem uten og med rogowskiprofil.

For å unngå denne feltforsterkningen kan overgangen mellom halvlederen som er i kontakt med elektroden og isolasjonen formes etter en rogowskiprofil slik det er gjort i systemet til høyre i Figur 2-8. Med denne formen vil feltforsterkningen være minimal, og det elektriske feltet vil bli jevnt fordelt over isolasjonen.

2.5 Partikkelbehandling

I dette forsøket er partikler plassert mellom to lag PEX for å simulere forurensingen som forekommer når PEX produseres. Partiklene som er brukt her er oksidert PEX. Det plasseres 10 partikler i hvert testobjekt. De 10 partiklene i hvert testobjekt er enten ubehandlet eller behandlet på en av to måter:

- 1) Chemlease PMR-90 – Slippmiddel
- 2) Nanokompositter – Heftemiddel

Slippmiddelet skal hindre heft mellom partiklene og isolasjonsmaterialet og dermed gi en økt sjans for at et hulrom dannes mellom overflatene. Heftemiddelet er designet for å ha motsatt virkning, altså å øke kohesjonen i grenseoverflaten mellom en partikkel og isolasjonsmaterialet og dermed forhindre hulromsdannelse mellom overflatene [9]. Nanokompositter er "fyllstoff" der minst en dimensjon er mindre enn 100 nm.

3 Metode

Dette kapitlet beskriver i hovedsak hvordan testobjektene er fremstilt og hvordan de eksperimentelle forsøkene er satt opp og utført.

3.1 Testobjekt

Testobjektet som er laget og undersøkt i forsøkene er såkalte Rogowski-kopper. En komplett Rogowski-kopp klar for test, er satt sammen av fire komponenter:

- 1) Råkopp av PE
- 2) PE plate
- 3) Halvleder
- 4) Halvleder med aluminiumelektrode

Før disse komponentene kan formes og settes sammen, må PE ekstruderes og halvleder valeses.

3.1.1 Ekstrudering av PE

Isolasjonsmaterialet som ble benyttet i testobjektene er et standard AC isolasjonsmateriale (LE4201), som er et polyetylen sammensatt med et organisk peroksid. Materialet ble levert i form av pellets og ble ekstrudert før det kunne formes. Grunnen til at materialet ekstruderes og ikke formes direkte fra pellets-form er for å unngå hulrom og forurensninger.

Ekstruderingen foregikk ved bruk av en ekstruder. Før denne tas i bruk må de delene som skal i kontakt med materialet demonteres og renses grundig med isopropanol. En skrue driver materialet med konstant hastighet fremover samtidig som materialet smeltes. Temperaturen på materialet bestemmes ved at ekstruderen er delt opp i seks forskjellige soner der temperaturen kan bestemmes individuelt, som vist i Tabell 3-1.

Tabell 3-1: Ulike temperatursoner for ekstrudering av PE.

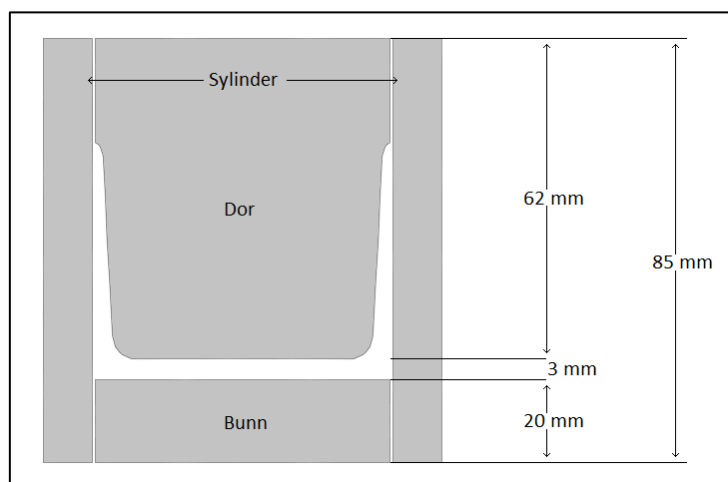
Sone	Temperatur [°C]
Sone 1	117 °C
Sone 2	117 °C
Sone 3	117 °C
Sone 4	117 °C
Sone 5	117 °C
Sone 6	15 °C

Materialet plasseres i form av pellets i inntakstrakten og ekstruderen programmeres med ønsket temperatur og hastighet før den aktiveres. Pelletene smeltes mens de er i kontakt med skruen og drives samtidig fremover. Når materialet når utgangen av ekstruderen er det i form av en tykt flytende masse, ved enden er det plassert et munnstykke som bestemmer formen på materialet. Denne formen kan varieres og det ble tatt i bruk to forskjellige former. En tykk tape ble produsert for å lage råkoppene, mens en tynn film ble produsert for å lage PE-platene. For å forsikre at materialet som skal brukes har en tilfredsstillende kvalitet ble den første halvmeteren av tapen og den første meteren av filmen skrapet. Når materialet så blir presset ut i ønsket form går det direkte over i en valse slik at det blir avkjølt og stivner i den formen som er bestemt. Ekstruderskruen roterte med en hastighet på 12 rpm, mens valsen gikk litt fortere for å unngå at materialet skulle få en bølgeform.

Etter ønsket mengde av materialet er ekstrudert, tilføres et rensmiddel som ekstruderes med samme fremgangsmåte. Dette materialet tar med seg resterende isolasjonsmateriale ut av ekstruderen og er selv lett å fjerne i etterkant.

3.1.2 Støping av råkopp

Da isolasjonsmaterialet var ferdig ekstrudert ble tapen presset ut til sirkulære tabletter på ca. 28 gram ved bruk av en pneumatisk presse. Tablettene ble så formet til råkopper med rogowskiprofil. Figur 3-1 viser et snitt av en støpeform som brukes til å støpe råkoppene.



Figur 3-1: Snitt gjennom støpeformene som brukes til å støpe råkoppene [10].

Før tablettene kunne plasseres i formene måtte disse poleres og renses grundig med isopropanol. De ble og påført fire lag med et slippmiddel (Frekote 55-NC), for å gjøre det lettere å få materialet ut av formene igjen uten å skade det.

Tablettene ble så plassert i formene, for å bestemme tykkelsen på bunnen av råkoppene ble det plassert skims på toppen av hver form. Skims med tykkelse 2,5 mm gir den ønskede bunntykkelsen på 0,3 mm, selv om det i Figur 3-1 kan se ut som om skims med tykkelse 2,7 mm vil gi den ønskede tykkelsen. Dette er på grunn av at materialet krymper når det avkjøles. For å unngå at overskuddsmaterialet fester seg mot pressen under støping ble formene dekket med en tykk plastfilm. Formene ble så plassert i en hydraulisk presse. I første fase skal ikke isolasjonsmaterialet kryssbindes, kun smeltes om til ønsket form. Innstillingen av pressen er da som vist i Tabell 3-2.

Tabell 3-2: Innstillinger for støping av råkopp.

Prosess	Temperatur [°C]	Trykk [tonn]	Varighet [minutter]
Lavtrykk	118	3,5	50
Høytrykk	118	25	12
Vannkjøling		25	18

Etter støping ble formene demontert og overskuddsmasse skjært vekk med en skalpell. Objektet som er igjen er en koppform i solid polyetylen som vist i Figur 3-2.



Figur 3-2: Venstre: skisse av råkopp, Høyre: snitt gjennom råkopp.

3.1.3 PE-plate

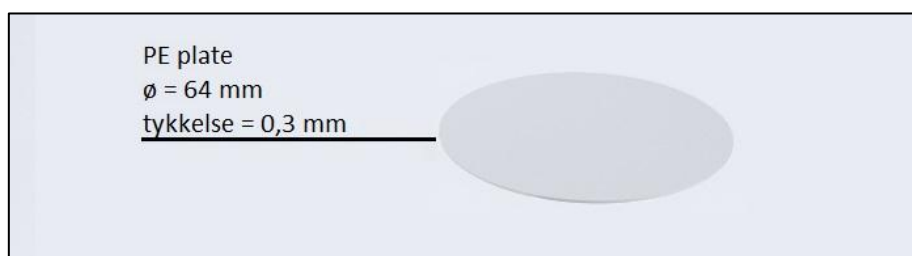
Da isolasjonsmaterialet var ferdig ekstrudert ble filmen klippet opp i biter på ca. 2 gram.

Før materialet kunne plasseres i formene måtte disse renses grundig med isopropanol. PE-bitene ble så plassert i formene og satt i en hydraulisk presse. For å beskytte isolasjonsmaterialet mot urenheter under støping ble det dekket med en tykk plastfilm. I denne fasen skal ikke isolasjonsmaterialet kryssbindes, kun smeltes om til ønsket form. Innstillingen av pressen ble da som vist i Tabell 3-3. Pressen ble varmet opp til 118 °C før materialet ble satt inn.

Tabell 3-3: Innstillinger for støping av PE plater.

Prosess	Temperatur [°C]	Trykk [tonn]	Varighet [minutter]
Lavtrykk	118	3,5	10
Høytrykk	118	25	2
Vannkjøling		25	8

Etter støping stanses materialet og sluttproduktet er en sirkulær PE plate med en diameter på 64 mm og en tykkelse på 0,3 mm som vist i Figur 3-3.



Figur 3-3: Skisse av PE plate.

3.1.4 Valsing av halvleder

Halvledermaterialet som er brukt i forsøkene er LE0592, en krysslinkbar polyetylen-sammensetning spesielt designet for PEX isolerte medium og høyspenningskabler (AC) som er kompatibel med LE4201. Materialet ble levert i form av pellets og ble valset før det kunne formes. Grunnen til at materialet vales og ikke ekstruderes er fordi valsing er en enklere prosess, som gir et godt resultat.

Før pelletene ble valset, måtte de tørkes i vakuum ved 60 °C i tre døgn for å fjerne fuktighet. Før valsen kan tas i bruk må den rengjøres grundig med isopropanol for å fjerne alle urenheter/partikler som måtte ha satt seg på overflaten. Valsen står i en flow benk som sørger for å holde partikkelforurensningen lav. Valsen består av to rulleelement med noe ulik omdreiningshastighet der temperaturen kan bestemmes individuelt. Temperaturen på valsen må stilles på forhånd, da det tar litt tid for temperaturen å stabilisere seg. Avstanden mellom elementene er justerbar slik at tykkelsen på halvlederen kan bestemmes.

Temperaturen på det fremre elementet ble satt til 105 °C mens det bakre ble satt til 115 °C, temperaturforskjellen gjør at halvlederen fester seg på det fremre elementet og ikke det bakre. Avstanden mellom elementene ble justert til sitt minimum og valsen ble satt til å dreie rundt. Pelletene ble så tømt ned mellom elementene der de smeltet og festet seg til det fremre elementet, avstanden mellom elementene ble så gradvis justert til 0,5 – 0,75 mm og valsingen fortsatte til halvlederen var jevn ved denne tykkelsen. Halvlederen ble så kjølt ned til under 50 °C før den kunne fjernes fra valsen.

3.1.5 Halvleder

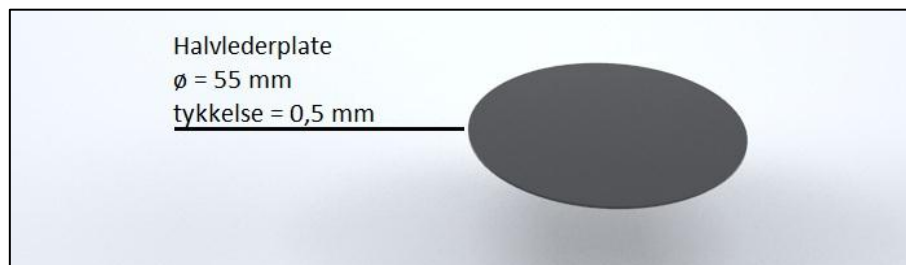
Da halvlederen var ferdig valset ble den klippet opp i biter på ca. 2 gram.

Før materialet kunne plasseres i formene måtte disse renses grundig med isopropanol. Halvlederbitene ble så plassert i formene og satt i en hydraulisk presse. For å beskytte halvlederen mot urenheter under støping ble den dekket med en tykk plastfilm, som på forhånd ble renses grundig med isopropanol. I denne fasen skal ikke materialet kryssbindes, kun smeltes om til ønsket form. Innstillingen av pressen ble da som vist i Tabell 3-4. Pressen ble varmet opp til 118 °C før materialet ble satt inn.

Tabell 3-4: Innstillinger for støping av halvleder.

Prosess	Temperatur [°C]	Trykk [tonn]	Varighet [minutter]
Lavtrykk	118	3,5	10
Høytrykk	118	25	2
Vannkjøling		25	8

Etter støping stanses halvlederen og sluttproduktet er en sirkulær halvleder med en diameter på 55 mm og en tykkelse på 0,5 mm som vist i Figur 3-4. Dette er isolasjonssystemets indre halvleder.



Figur 3-4: Skisse av indre halvleder.

3.1.6 Halvleder med aluminiumelektrode

Da halvlederen var ferdig valset ble den klippet opp i biter på ca. 2 gram, på samme måte som da halvlederen ble støpet alene.

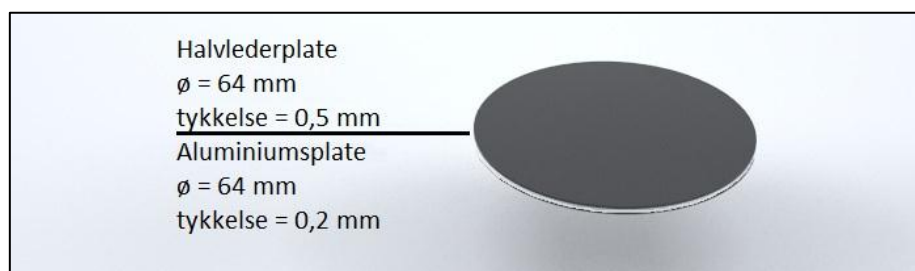
Aluminiumsfolie med tykkelse 0,2 mm ble kuttet i 9x9 cm store rektangler og den ene siden ble børstet med stålbørste for å gi en god kontaktflate mot halvlederen.

Før materialene kunne plasseres i formene måtte disse renses grundig med isopropanol. Halvlederbitene og aluminiumsfolien ble så plassert i formene og satt i en hydraulisk presse. I denne fasen skal ikke isolasjonsmaterialet kryssbindes, kun smeltes om til ønsket form. Innstillingen av pressen ble da som vist i Tabell 3-5. Pressen ble varmet opp til 118 °C før materialet ble satt inn.

Tabell 3-5: Innstillinger for støping av halvleder med aluminiumelektrode.

Prosess	Temperatur [°C]	Trykk [tonn]	Varighet [minutter]
Lavtrykk	118	3,5	10
Høytrykk	118	25	2
Vannkjøling		25	8

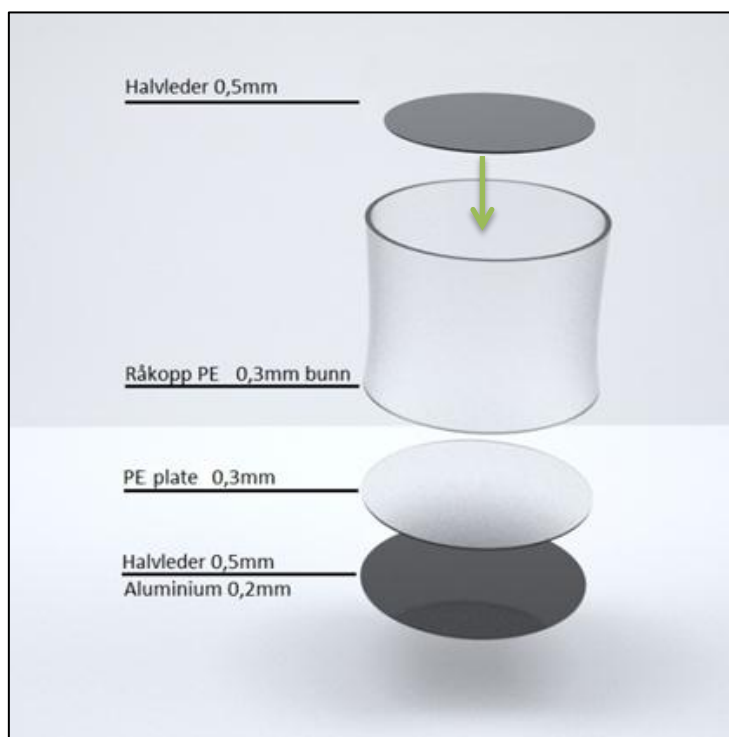
Etter støping klippes overskuddsmasse vekk og sluttproduktet er en sirkulær halvleder med aluminiumelektrode med en diameter på 64 mm og en tykkelse på 0,7 mm som vist i Figur 3-5. Dette er isolasjonssystemets ytre halvleder.



Figur 3-5: Skisse av ytre halvleder med aluminiumelektrode på undersiden.

3.1.7 Sammenstilling av Rogowski-kopp

Da råkoppen, PE platen, indre og ytre halvleder var ferdig, ble de sammenstilt som vist på Figur 3-6. De samme støpeformene som ble benyttet til å støpe råkoppene ble også benyttet til å sammenstille Rogowski-koppene (Figur 3-1).



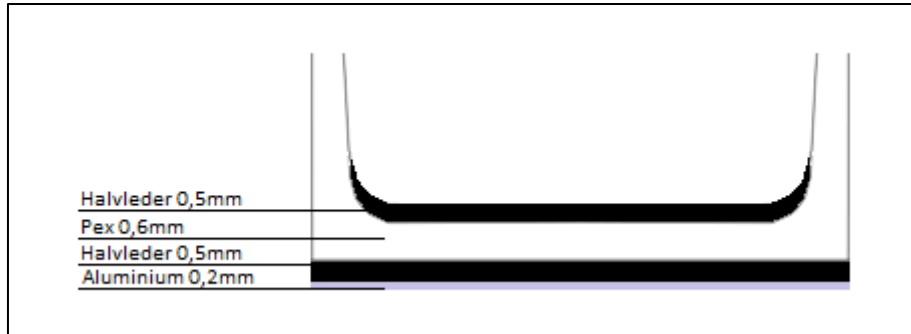
Figur 3-6: Sammenstilling av Rogowski-kopp.

Før delene kunne plasseres tilbake i formene måtte disse på ny poleres, renses grundig med isopropanol og påføres slippmiddel. Det ble brukt skims med tykkelse 1,0 mm ved sammenstilling. For å unngå at isolasjonsmaterialet fester seg mot pressen under støping ble formene dekket med en tykk plastfilm. I siste fase sammenstilles alle komponentene sammen til et objekt og det er i denne fasen materialene kryssbindes. Dette oppnås ved å øke temperaturen i pressen fra 118 °C til 170 °C, innstillingene ble da som vist i Tabell 3-6. Pressen ble varmet opp til 118 °C før materialet ble satt inn og så økt til 170 °C.

Tabell 3-6: Innstillinger for sammenstilling av Rogowski-kopp.

Prosess	Temperatur [°C]	Trykk [tonn]	Varighet [minutter]
Lavtrykk	170	3,5	0,5
Høytrykk	170	25	42
Vannkjøling		25	18

Etter støping skjæres overskuddsmasse vekk med en skalpell. Sluttproduktet er en koppform i PEX, med indre og ytre halvleder og en aluminiumelektrode i bunn. Figur 3-7 viser et snitt av en sammenstilt Rogowski-kopp.



Figur 3-7: Snitt av sammenstilt Rogowski-kopp.

Før testobjektet kunne testes i forsøkene måtte de avspennes og avgasses. Dette gjøres i et ventilert varmeskap og prosessene er beskrevet i Tabell 3-7. Hensikten med avspenningen er å redusere de mekaniske kreftene som virker på objektene etter kryssbinding, mens hensikten med avgassing er å fjerne biprodukter fra kryssbindingsprosessen [10].

Tabell 3-7: Temperatur og varighet ved avspenning og avgassing.

Prosess	Temperatur [°C]	Varighet
Avspenning	130	15 minutter
Avgassing	90	3 døgn

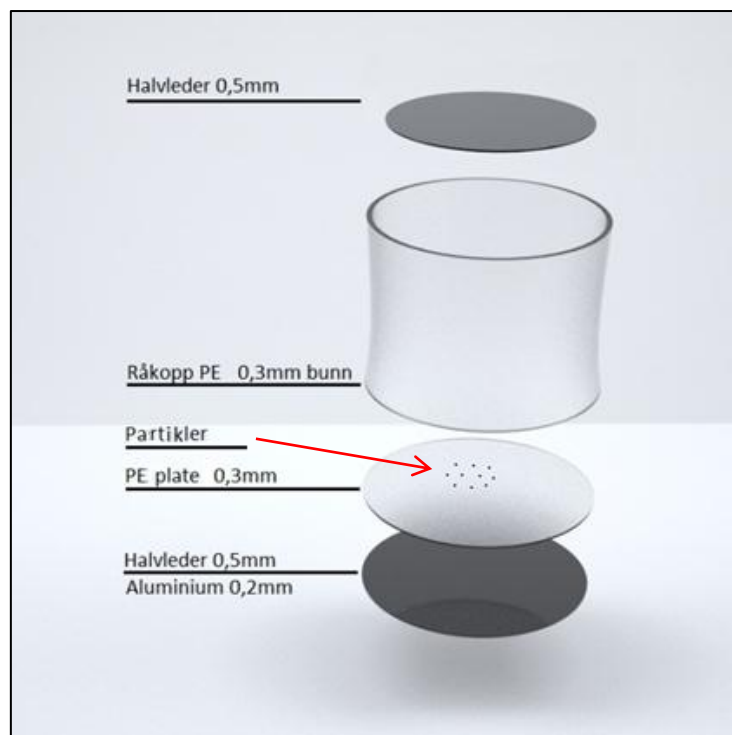
3.1.8 Partikkelbehandling

Testobjektene har før forsøkene blitt behandlet på fire forskjellige måter.

- 1) Referanse – Testobjekt uten tilsatte partikler.
- 2) Ubehandlet – Testobjekt tilsatt ubehandlede partikler.
- 3) Heftemiddel – Testobjekt tilsatt partikler behandlet med nanokompositter.
- 4) Slippmiddel – Testobjekt tilsatt partikler behandlet med Chemlease PMR-90.

Partikkelbehandlingen ble utført av Sintef Materialer og Kjemi, de utførte også en FTIR analyse av partikkeloverflatene for å forsikre seg om at de hadde fått en god jevn behandling.

Der det er tilsatt partikler er disse plassert mellom råkoppen og PE platen før sammenstilling (kryssbinding). Det plasseres 10 partikler i hvert av disse testobjektene. Plasseringen er markert med en rød pil i Figur 3-8. Partiklene er i mikrometer ($120 - 150\mu\text{m}$) størrelsesorden, størrelsen er derfor overdrevet i figuren.



Figur 3-8: Plassering av partikler.

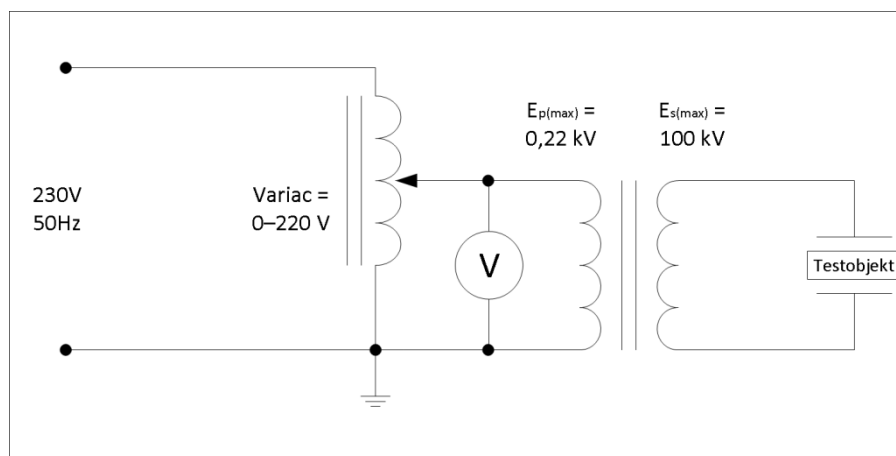
Bilder av hvordan partiklene er plassert før og etter sammenstilling finnes i Vedlegg A.

3.2 Testoppsett

Det ble utført forsøk for å undersøke testobjektene holdfasthet mot henholdsvis rampespenning og stegspenning. Dette ble gjort ved å måle gjennomslagspenning og partielle utladninger. I begge tilfellene er det undersøkt testobjekter som er behandlet på de fire forskjellige måtene som er beskrevet i forrige delkapittel.

3.2.1 Måling av gjennomslagspenning

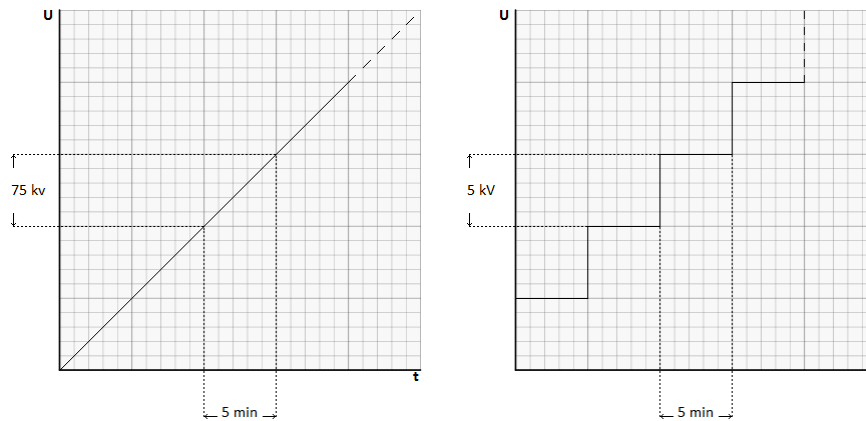
For å undersøke testobjektene holdfasthet ble måleoppsettet som er vist i Figur 3-9 benyttet. Kretsen ble forsynt fra nettet via en variac og en høyspennings-transformator. Voltmeteret ble plassert ved utgangen av variacen og måler spenningen på primærsiden av transformatoren. En fullstendig utstyrsliste finnes i vedlegg B.



Figur 3-9: Enlinjeskjema for måleoppsett benyttet til å måle gjennomslagspenning.

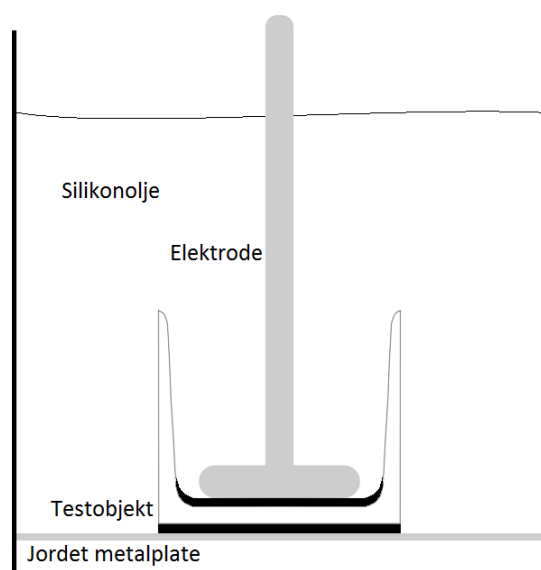
For å undersøke testobjektene holdfasthet mot rampespenning ble den variable spenningskilden satt til å levere en lineært økende rampespenning over testobjektet til det ble gjennomslag. Økningen var satt til 33 V/m på primærsiden, som tilsvarer 15 kV/m på sekundærsiden. Dette er den effektive økningen over testobjektet. Økningen er illustrert i Figur 3-10. En sikringsstyrt bryter sørget for at kretsen ble brutt med en gang det ble gjennomslag. En ulempe med rampespenning er at det går kort tid fra partielle utladninger til det blir gjennomslag, den er derfor best egnet for å finne "korttidsholdfasthet". En stegspenning derimot holdes konstant på et spenningsnivå i en bestemt periode før den økes. En påtrykt rampespenning (over et hulrom) vil derfor ikke nødvendigvis påvirke gjennomslagsnivået i like stor grad som om en stegspenning påtrykkes.

For å undersøke testobjektene holdfasthet mot stegspenning ble den variable spenningskilden manuelt regulert ved å øke spenningen med 11 V på primærsiden hvert 5. minutt. På sekundærsiden av transformatoren tilsvarer dette 5 kV, dette er og illustrert i Figur 3-10.



Figur 3-10: Venstre: skisse av rampespenning, Høyre: skisse av stegspenning.

Testobjektet ble plassert i bunnen av en keramisk tank på en jordet metallplate. Under forsøkene var denne tanken fylt med silikonolje, slik at hele testobjektet var dekket. Silikonolje brukes for å hindre overslag, altså forhindre at det går en strøm langs isolasjonsmaterialet og til jord. Silikonolje brukes da permittiviteten er tilnærmet lik den til testobjektet ($\epsilon_{\text{olje}} \approx \epsilon_{\text{objekt}}$), dermed blir det ingen feltforsterkning. Plasseringen er vist i Figur 3-11, figuren er ment som en illustrasjon og er ikke i rett skala.



Figur 3-11: Plassering av testobjekt i silikonolje.

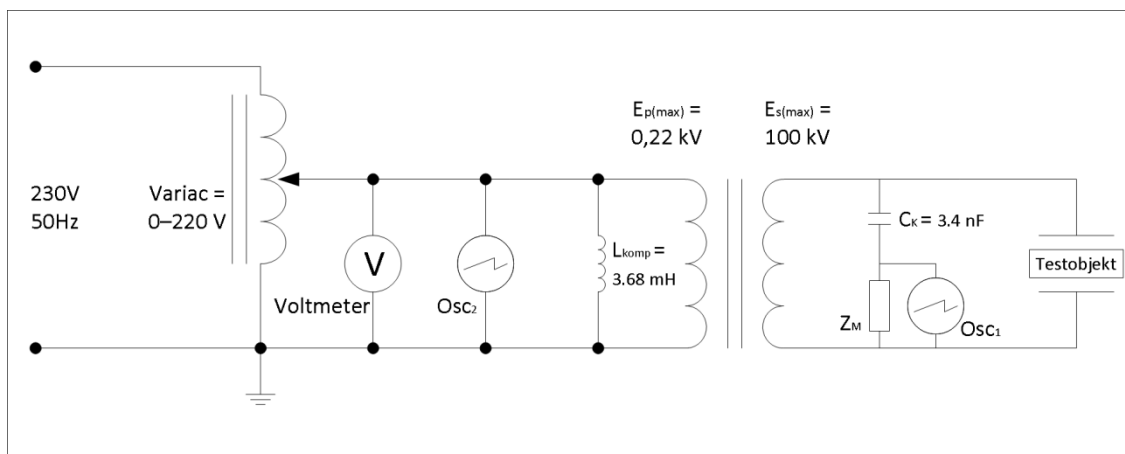
3.2.2 Måling av partielle utladninger

For å måle partielle utladninger i testobjektene ble måleoppsettet som er vist i Figur 3-12 benyttet. Kretsen ble forsynt fra nettet via en variac og en høyspennings-transformator. Voltmeteret ble plassert ved utgangen av variacen og måler spenningen på primærsiden av transformatoren som før. Deteksjonskretsen for partielle utladninger er plassert på sekundærsiden av transformatoren, med en koblingskondensator (C_k) i serie med en måleimpedans (Z_M). Disse er igjen parallellkoblet med testobjektet og spenningskilden. Spenningspulsene ved partielle utladninger målt over måleimpedansen med et oscilloskop, kanal 2 på det samme oscilloskopet bruktes som referanse ved å måle sinusspenningen ut fra spenningskilden (variacen).

Deteksjonskretsen må kalibreres for at det skal være mulig å måle størrelsen på utladningene. En kjent ladning påtrykkes over prøveobjektet ved å benytte en kalibrator. Den påtrykte ladningen fører til at det går en strøm i deteksjonskretsen, som igjen fører til en spenningspuls over måleimpedansen. Forholdet mellom den kjente påtrykte ladningen og den tilhørende spenningspuls utgjør det som kalles kalibreringsfaktoren. Ligning 3-1 viser hvordan denne brukes for å finne tilsynelatende ladning, k er kalibreringsfaktoren og ΔU er spenningspuls over måleimpedansen ved en partiell utladning [6].

$$Q_{\text{tilsynelatende}} = k \cdot \Delta U \quad (3-1)$$

Testobjektet ble påtrykt en lineært økende rampespenning (Figur 3-10) opp til spenningsnivået der det først var mulig å se partielle utladninger på oscilloskopet (begynnelsespenning). Spenningen ble så lineært redusert med samme hastighet ned til spenningsnivået der det ikke lenger var mulig å se partielle utladninger på oscilloskopet (slukkespenning). Disse spenningsnivåene ble notert og skjermbilder fra oscilloskopet ble kopiert som dokumentasjon. En sikringsstyrt bryter sørget for at kretsen ble brutt om det skulle bli gjennomslag før målingene var gjennomført.



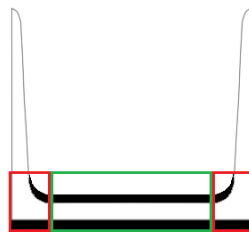
Figur 3-12: Enlinjeskjema for måleoppsett benyttet til å måle partielle utladninger.

For å oppnå best mulig nøyaktighet i målingene bør koblingskondensatoren være like stor som kapasitansen til testobjektet, og helst større. Koblingskondensatoren som ble benyttet var så stor ($C_k=3.4\text{nF}$) at den kapasitive strømmen som ble trukket fra spenningskilden utløste den sikrings-styrte bryteren og kretsen ble brutt før det oppstod partielle utladninger. Det ble derfor nødvendig å kompensere for den kapasitive strømmen med en spole ($L_{\text{komp}}=3.68\text{mH}$). En fullstendig utstyrsliste finnes i vedlegg B.

Testobjektet var plassert i en keramisk tank fylt med silikonolje, på samme måte og med samme formål som ved måling av gjennomslagspenning.

4 Resultater

Fra tidligere forsøk [11] var det visshet om et problem med fremstillingen av testobjekter. Flere av gjennomslagene kom ut mot siden av testobjektet, merket rødt i Figur 4-1. Et eksempel på et slikt gjennomslag er vist i Vedlegg C. Det er ønskelig å få gjennomslaget i senter av det grønne området, der det er tilsatt partikler. De avrundede kantene er formet som en rogowskiprofil og har som formål å fordele feltet slik at det er sterkeste i den grønne delen og svakere ut på kantene, som forklart i kapittel 2.4. Når gjennomslagene allikevel kommer i området merket rødt, tyder det på en feil i testobjektene.



Figur 4-1: Snitt av Rogowski-kopp.

Som en følge av disse problemene måtte det utføres feilsøking på testobjektene før forsøkene med partikler kunne begynne. Feilsøkingen og flere mulige feilkilder er beskrevet videre i dette kapitlet.

4.1 Feilsøking

Isolasjonsmaterialet som er benyttet er i hovedsak LE4201, men det er også benyttet LS4201S i en testserie. De har begge en forventet holdfasthet på 100 kV/mm. Den totale isolasjonstykkelsen i testobjektene er 0,6 mm, så testobjektene bør altså tåle en spenning på 60 kV.

Det ble først påtrykt en steg- eller rampe-spenning over testobjektet til det ble gjennomslag. Testobjektene ble så snittet opp i 0,25 mm tykke strimler ved bruk av et mikrotom og deretter undersøkt med et mikroskop.

Feilsøkingprosessen er i første omgang delt inn etter den parameteren som ble justert eller endret. Pressen har kapasitet til å sammenstille ni testobjekter om gangen, prosessen er derfor videre delt inn i testserier på ni testobjekter hver. Siden førsteprioriteten er å finne feilkilden som forårsaker defektene i testobjektene, ble alle testseriene laget uten partikkelforurensning.

Justering av kun skimstykkelser som feilsøkingparameter er allerede utført [11], men hver testparameter som er blitt justert er gjerne undersøkt med forskjellige skimstykkelser.

4.1.1 Ny type indre halvleder (0,6 mm)

Testserie 1

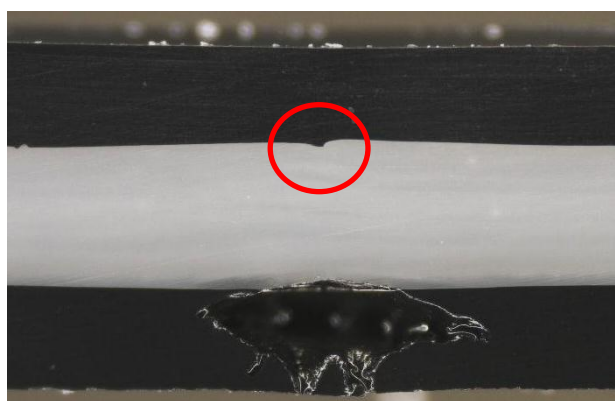
Det ble først produsert tre testobjekter med standard fremgangsmåte, et med 0,95 mm skims og to med 1,00 mm skims. Disse testobjektene ble så testet med stegspenning som beskrevet i kapittel 3.2.1 og Figur 3-10. Resultatene er presentert i Tabell 4-1.

Tabell 4-1: Gjennomslagsverdier for tre testobjekt med to ulike skimstykkelser, fra testserie 1.

Testobjekt	Skimstykkelser	Gjennomslagsverdi
4	0,95 mm	40 kV
5	1,00 mm	10 kV
6	1,00 mm	20 kV

Det kommer klart frem av Tabell 4-1 at testobjektene ikke holder en tilfredsstillende kvalitet. Testobjektene er ikke i nærheten av den forventede holdfastheten på 60 kV.

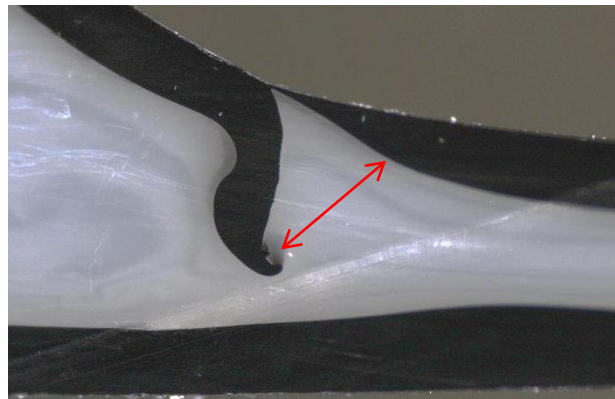
Testobjekt 4 fikk gjennomslag i det grønne område i Figur 4-1, men ved kun 40 kV. Da det ikke er plassert partikler i dette testobjektet er dette en lav spenning å få gjennomslag ved. Nærmere undersøkelse med mikroskop avslørte en defekt ved sentrum av testobjektet som vist i Figur 4-2. En liten del av halvledermaterialet er presset ned i isolasjonsmaterialet, dette vil gi en lokal feltforsterkning og følgelig et gjennomslag ved en lavere spenning enn det testobjektet teoretisk skal tåle. En defekt av denne typen er høyst sannsynlig et resultat av en svakhet i overflaten til isolasjonsmaterialet, halvledermaterialet eller begge.



Figur 4-2: Testobjekt 4, testserie 1.

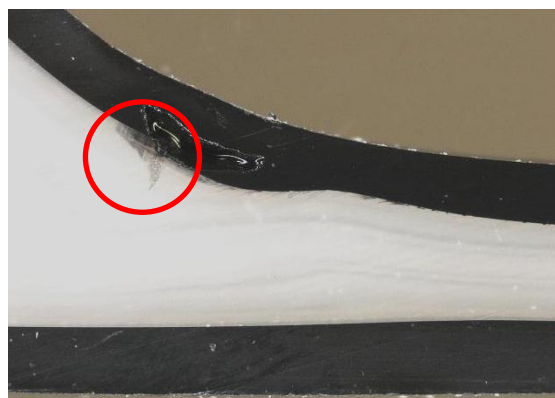
Testobjekt 5 fikk gjennomslag i det røde området i Figur 4-1 ved 10 kV. Etter nærmere undersøkelse med mikroskop kommer det klart frem hvorfor testobjektet fikk gjennomslag ved så lav spenning. Som vist i Figur 4-3, har en stor del av den indre halvlederen trengt ned i

isolasjonsmaterialet under sammenstilling. Det kan se ut som halvlederen har fått et kutt, som under trykk har blitt separert fra resten av halvlederen og presset ned i isolasjonsmaterialet. Om denne defekten og er et resultat av en svakhet i isolasjonsmaterialet er vanskelig å fastslå. Som en følge av dette vil det som i testobjekt 4 oppstå en lokal feltforsterkning, i tillegg blir isolasjonstykkelsen i det utsatte området kraftig redusert.



Figur 4-3: Testobjekt 5, testserie 1.

Testobjekt 6 fikk gjennomslag i det røde området ved 20 kV. Mikroskopianalysen viser at det også her er det halvledermaterialet som trenger ned i isolasjonsmaterialet. Defekten er av lignende karakter som defekten i testobjekt 4, men i større grad. Som vist i Figur 4-4, ser det ut som halvledermaterialet fyller en svakhet i isolasjonsmaterialet, men denne gangen forekommer defekten i kanten av testobjektet.



Figur 4-4: Testobjekt 6, testserie 1.

En mulig feilkilde er at det er svakheter i enten overflaten til PE-råkopp, den indre halvlederen eller begge som gir ujevnheter. Om dette stemmer ville disse svakheterne måtte ha kommet fra ujevnheter (riper, hakk) i støpeformene. Siden defekten forekommer mellom indre

halvleder og PE-råkoppen ble det undersøkt om det fantes alternativer til disse støpeformene. Det fantes ikke alternativer til støpeformene som ble brukt i produksjonen av PE-råkopper, derimot var det mulig å prøve en annen type støpeformer til produksjonen av halvlederne. Det ble derfor produsert indre halvledere i en annen type støpeformer som ikke var like slitt som de originale støpeformene. De nye formene har større radius og tykkelsen kan justeres manuelt ved bruk av skims, slik det er mulig med støpeformene til råkoppen.

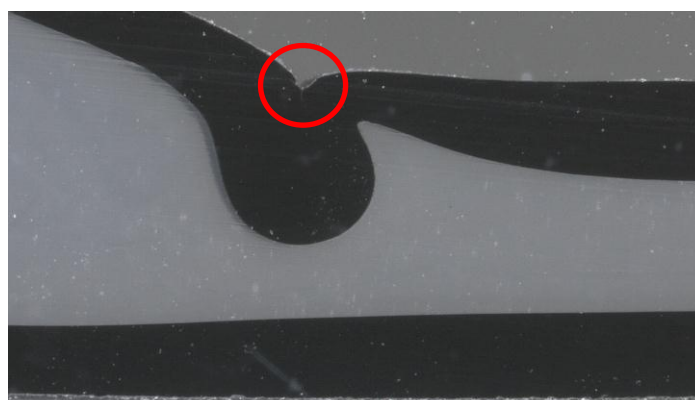
Det ble produsert tre nye testobjekter med den nye typen halvleder, et med 0,95 mm skims og to med 1,00 mm skims. Testobjektene ble så testet og resultatene er presentert i Tabell 4-2.

Tabell 4-2: Gjennomslagsverdier for tre testobjekt med "ny indre halvleder", fra testserie 1.

Testobjekt	Skimstykkelse	Gjennomslagsverdi
7	0,95 mm	25 kV
8	1,00 mm	Overslag 60 kV
9	1,00 mm	35 kV

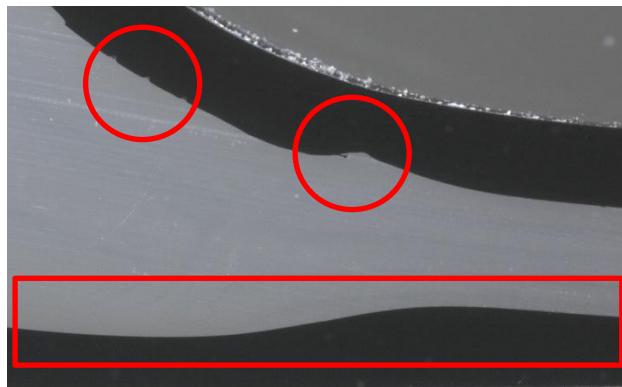
Testobjektene her er av vekslende kvalitet. To av testobjektene er langt fra den forventede holdfastheten, mens et testobjekt fikk overslag. Det vil si at en strøm gikk veien opp rundt kanten på testobjektet og ned igjen til jord på utsiden av objektet på tross av silikonoljen.

Testobjekt 7 hadde tegn til ujevnheter i overflaten og fikk gjennomslag i det røde området ved 25 kV. Mikroskop-analysen avslørte en stor defekt i grenseflaten til materialene som vist i Figur 4-5. Det ser ut som om det har vært for trangt på tross av at skimstykkelser er redusert til 0,95 mm. På grunn av defektens avrundede form har ikke feltforsterkningen vært like strek her som i tidligere testobjekt, men isolasjonstykkelser er mindre enn halvparten av det den skal være og resultatet er gjennomslag ved en lav spenning.



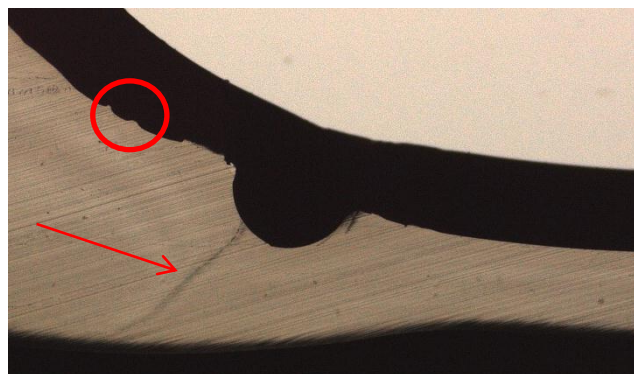
Figur 4-5: Testobjekt 7, testserie 1.

Testobjekt 8 fikk overslag ved 60 kV, som er spenningen testobjektet teoretisk skal tåle om bunnen er eksakt 0,6 mm. Dette tyder da på at testobjektet er av god kvalitet, men som mikroskop-analysen i Figur 4-6 viser er det også her ujevnheter i grensoverflaten mellom halvleder og isolasjonsmaterialet. En forskjell er at det ser mer ut som om det er isolasjonsmaterialet som har trengt inn i halvledermaterialet enn det motsatte. Overgangen mellom isolasjon og ytre halvleder (bunnen av testobjektet) bærer preg av at det har vært trangt under sammenstillingen. Det er mest masse ut mot kantene av testobjektet dermed blir og den termiske utvidelsen størst her, om det er for trangt vil for mye av halvlederen i dette området presses ut av støpeformen.



Figur 4-6: Testobjekt 8, testserie 1.

Testobjekt 9 fikk gjennomslag i det røde området ved 35 kV. Og som Figur 4-7 viser har testobjektet både defekter lik de i testobjekt 7 og 8. Det er en stor defekt der det ser ut til å være halvledermaterialet som trenger inn i isolasjonsmaterialet, samtidig er det en tynn kanal med halvledermaterialet som har utspring fra den store defekten og nesten strekker seg ned til den ytre halvlederen (rød pil). Det er og flere små defekter der det ser mer ut som om det er isolasjonsmaterialet som trenger inn i halvledermaterialet. Overgangen mellom isolasjon og ytre halvleder tyder på at det har vært for trangt under sammenstilling.



Figur 4-7: Testobjekt 9, testserie 1.

Problemet i overgangen mellom indre halvleder og isolasjonen ble ikke løst ved å skifte ut støpeformene, og i tillegg dukket det opp et nytt problem der det ser ut som det blir for trangt under sammenstillingen av testobjektene.

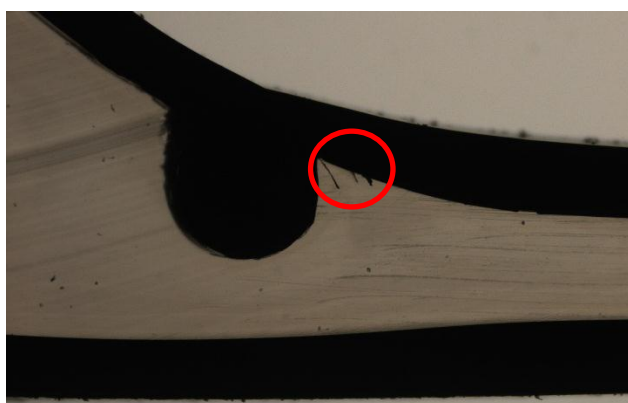
For å se nærmere på forskjellene på den nye og gamle typen halvleder ble det produsert tre nye testobjekter, to med den nye typen halvleder og en med den gamle. Testobjektene ble så testet og resultatene er presentert i Tabell 4-3.

Tabell 4-3: Gjennomslagsverdier for tre testobjekt med to ulike typer indre halvleder, fra testserie 1.

Testobjekt	Skimstykkelse	Indre halvleder	Gjennomslagsverdi
1	1,00 mm	Gammel	40 kV
2	1,00 mm	Ny	25 kV
3	1,00 mm	Ny	40 kV

Som Tabell 4-1 viser var det ingen av testobjektene som var av ønsket kvalitet. Gjennomslagsverdiene viser ingen forskjell på testobjektene med indre halvleder av henholdsvis gammel og ny type.

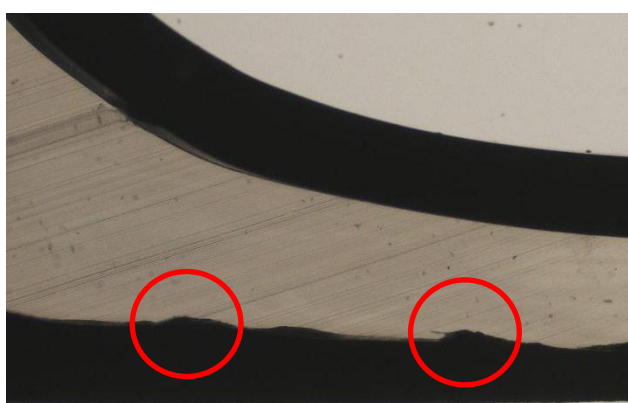
Testobjekt 1 fikk gjennomslag i det røde området ved 40 kV. Det er en stor defekt der det ser ut til å være halvledermaterialet som trenger inni isolasjonsmaterialet, det er og flere små defekter som vist i Figur 4-8. Med unntak av karakteristikken til de små defektene er testobjektet meget lik test-objekt 9, og gjennomslagspenningen ligger i samme området. Dette er på tross av at det er brukt forskjellig type indre halvleder.



Figur 4-8: Testobjekt 1, testserie 1.

Testobjekt 2 fikk gjennomslag i det røde området ved 25 kV. Det er en stor og flere små defekter som alle er av samme type, halvledermaterialet ser ut til å trenge inn i isolasjonsmaterialet i form av en spiss som peker ut mot kanten av testobjektet som vist i Figur 9-7 i vedlegg D. Dette testobjektet ser ikke ut til å ha hatt det like trangt under sammenstilling som de andre testobjektene med den nye typen indre halvleder.

Testobjekt 3 fikk gjennomslag i det røde området ved 40 kV. Dette testobjektet skiller seg ut fra de andre ved at overgangen mellom indre halvleder og isolasjonen er tilnærmet feilfri, mens overgangen mellom isolasjonen og ytre halvleder er full av ujevnheter som vist i Figur 4-9. Konsekvensene blir allikevel de samme, det blir feltforsterkning og gjennomslag.



Figur 4-9: Testobjekt 3, testserie 1.

Testserie 2

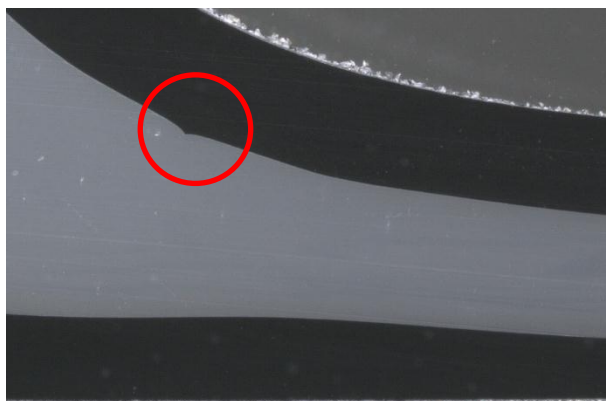
For å redusere faren for at tilfeldigheter skal påvirke feilsøkingen og for å kunne gjøre en bedre vurdering ble det produsert ni nye testobjekter, alle med den nye typen halvleder og 1,0 mm skims. Testobjekt 1 ble påsatt den samme typen stegspenning som før og fikk overslag ved 60 kV. For å spare tid ble testobjekt 2 påsatt en rampespenning (som beskrevet i kapittel 3.2.1 og Figur 3-10), mens testobjekt 3 ble påsatt en stegspenning der stegene (intervallene) ble redusert til 2 minutter. Resultatene for de første tre testobjektene er presentert i Tabell 4-4.

Tabell 4-4: Gjennomslagsverdier for tre testobjekt med ulike typer testspenning, fra testserie 2.

Testobjekt	Skimstykkelse	Testspenning	Gjennomslagsverdi
1	1,00 mm	Steg, 5 min intervall	Overslag 60 kV
2	1,00 mm	Rampe	63 kV
3	1,00 mm	Steg, 2 min intervall	25 kV

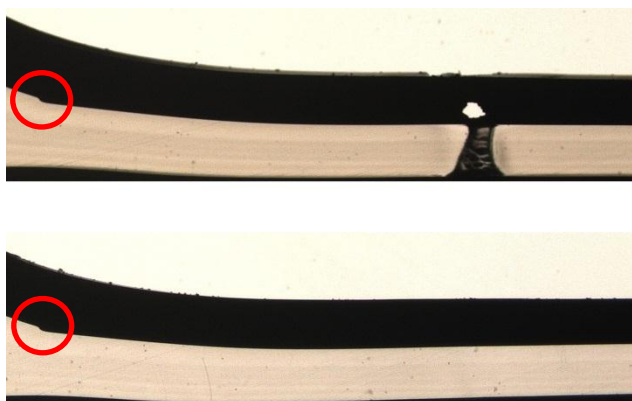
Testobjekt 1 fikk overslag ved 60kV. Dette kan tyde på et feilfritt testobjekt, men nærmere undersøkelse med mikroskop viste at det allikevel er en liten ujevnheter i overgangen mellom

materialene, det er også tegn på at det har vært litt trangt under sammenstilling som vist i Figur 4-10. Hadde det vært mulig å masseprodusere kopper med denne kvaliteten ville det sannsynligvis vært godt nok for å kunne undersøke partikkelforurensninger.



Figur 4-10: Testobjekt 1, testserie 2.

Testobjekt 2 fikk gjennomslag i det grønne området ved 63 kV. Mikroskopanalysen viser en liten ujevnheter som er meget lik den i testobjekt 1. At testobjektet får gjennomslag i det flate området støtter opp om antagelsen som ble gjort etter analysen av testobjekt 1. Også i dette testobjektet er det tegn på at det har vært trangt under sammenstilling, som vist i Figur 4-11.



Figur 4-11: Testobjekt 2, testserie 2. Over: gjennomslagskanal. Under: 0,25 mm fra gjennomslagskanalen.

Testobjekt 3 fikk gjennomslag i det røde området ved 25 kV. Defekten er vist i Figur 4-12 og ved første øyekast virker også denne ujevnheten meget lik de som ble funnet i testobjekt 1 og 2, men etter nærmere undersøkelse viser det seg at den består av to små defekter der den ene har en meget skarp form. Dette fører til en feltforsterkning som er sterk nok til at gjennomslagspenningen blir så lav som 25 kV.



Figur 4-12: Testobjekt 3, testserie 2.

Siden prioriteringen er å finne feilkilden, ble stegspenning med 2 minutters intervaller benyttet videre i testforsøkene for å spare tid. Resultatene for de resterende seks testobjektene er presentert i Tabell 4-5.

Tabell 4-5: Gjennomslagsverdier for seks testobjekt fra testserie 2.

Testobjekt	Skimstykkelse	Gjennomslagsverdi
4	1,00 mm	35 kV
5	1,00 mm	Overslag 65 kV
6	1,00 mm	15 kV
7	1,00 mm	20 kV
8	1,00 mm	30 kV
9	1,00 mm	20 kV

Testobjekt 5 fikk overslag ved 65 kV, og mikroskopanalysen viste at grenseoverflaten er nærmest identisk med testobjekt 1. En jevn og glatt grenseflate mellom halvleder og isolasjon, men med en liten spiss defekt. Defekten fører likevel ikke til gjennomslag.

Testobjekt 4, 6, 7 og 8, fikk alle gjennomslag i det røde området mellom 15-35 kV. Testobjekt 8 er brukt som eksempel i Figur 9-8 i vedlegg D, det representerer en defekt av typen som ble funnet i alle disse fire testobjektene. Denne typen defekt likner den som ble funnet i testobjekt 7 fra testserie 1, med unntak av at denne defekten er litt mindre rund i formen. Som tidligere er det også her tegn til at det har vært trangt under sammenstilling.

Testobjekt 9 fikk gjennomslag i det røde området ved 20 kV som vist i Figur 9-9 i vedlegg D. Ujevnheterne i grenseoverflaten er av en litt annen karakter enn det som har vært funnet før. Det er både tegn til at halvleder-materialet trenger inn i isolasjonsmaterialet (nederste røde markering) og motsatt (øverste røde markering). Den røde pilen markerer den ytterste delen av gjennomslagskanalen som ble med i dette snittet, og er altså ikke en defekt i testobjektet.

Da det er tegn på at det har vært for trangt under sammenstilling av samtlige testobjekt etter at støpeformene ble bytte ut ble bunnene målt. Det viste seg at halvlederne som ble produsert med de nye formene ble ca. 0,6 mm tykke selv om de var skimset til å bli 0,5 mm. Etter noen forsøk med å justere tykkelsen på skimsen viste det seg at det var kanalene som skal lede vekk overflødig masse som ikke var effektive nok. For å unngå problemet var det nødvendig å finne akkurat rett mengde materiale så det ble minst mulig overflødig masse som måtte ledes vekk. Da det ble funnet rett mengde materiale som skulle brukes måtte dette plasseres helt i sentrum av støpeformene, ellers vill ikke formene fylles på den ene siden mens det vil renne over på den andre siden og resultatet blir en halvleder som er under 0,5 mm på ene siden og over 0,5 mm på andre siden.

4.1.2 Ny type indre halvleder (0,5 mm)

Testserie 3

Det ble produsert ni nye testobjekt der tykkelsen på den indre halvlederen er redusert fra 0,6 til 0,5 mm og alle objektene har 1,00 mm skims. Resultatet ble tilsynelatende meget dårlig, med mye krater-liknende ujevnheter på overflaten til samtlige testobjekt. Det er tidligere påvist sammenheng mellom denne typen ujevnheter og defekter i grenseflaten mellom materialene [11]. De ble derfor ikke testet med spenning.

Testserie 4

Det ble forsøkt å øke tykkelsen på skimsen for å bli kvitt ujevnheter i overflaten. Det ble og produsert tre testobjekt med den gamle typen halvleder (kontrollmålt \approx 0,5 mm), for å undersøke om det var den nye typen halvleder som var kilden til ujevnheter. De forskjellige sammensetningene er presentert i Tabell 4-6.

Tabell 4-6: Sammensetning av testserie 4.

Testobjekt	Skimstykkelse	Indre halvleder
1-3	1,05 mm	Ny (0,5 mm)
4-6	1,10 mm	Ny (0,5 mm)
7-9	1,05 mm	Gammel (0,5 mm)

Samtlige testobjekter var tilsynelatende av dårlig kvalitet. Det var ujevnheter av samme type som i testserie 3, de ble derfor ikke testet med spenning.

4.1.3 Justering av temperaturinstillinger

Testserie 5

Etter konsultasjon med forskere fra SINTEF ble det produsert ni nye testobjekter der temperaturinnstillingene til pressa ble forandret. Testobjektene ble satt direkte inn ved makstemperatur og makstemperaturen ble økt fra 170 til 180 °C [10]. Som resultatene i Tabell 4-7 viser ble kvaliteten på testobjektene meget dårlige, det var kun ett testobjekt som hadde en gjennomslagsverdi høyere enn 10 kV.

Tabell 4-7: Gjennomslagsverdier for testserie 5.

Testobjekt	Skimstykkelse	Gjennomslagsverdi
1	0,90 mm	10 kV
2	0,90 mm	5 kV
3	0,90 mm	10 kV
4	1,00 mm	10 kV
5	1,00 mm	10 kV
6	1,00 mm	5 kV
7	0,95 mm	10 kV
8	0,95 mm	10 kV
9	0,95 mm	30 kV

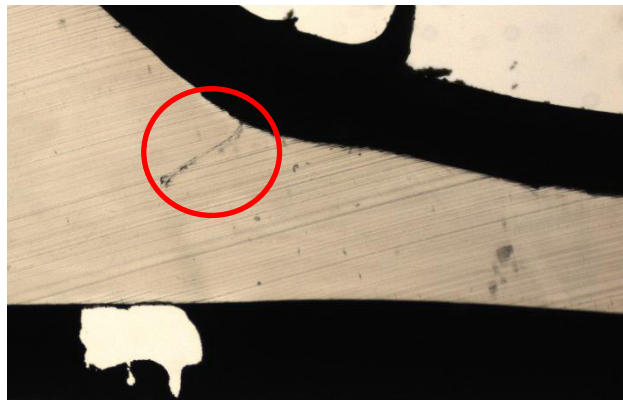
Testobjekt 1 og 8 fikk gjennomslag i det røde området ved 10 kV. Testobjekt 1 i Figur 9-10 i vedlegg D, viser hvilken type defekt som ble funnet i disse testobjektene. Det er en stor defekt der det ser ut til å være halvledermaterialet som trenger inn i isolasjonsmaterialet, samtidig er det en tynn kanal med halvledermaterialet som har utspring fra den store defekten og nesten strekker seg ned til den ytre halvlederen (rød pil). Defekten ligner den som ble funnet i testobjekt 9 fra testserie 1 (Figur 4-7).

Testobjekt 2, 3, 4, 5, 6 og 7 fikk alle gjennomslag i det røde området ved 5-10 kV. Testobjekt 2 i Figur 4-13 viser hvilken type defekt som ble funnet i disse testobjektene. En stor mengde av materialet fra den indre halvlederen er presset inn i isolasjonsmaterialet, nesten helt igjennom til den ytre halvlederen.



Figur 4-13: Testobjekt 2, testserie 5.

Testobjekt 9 fikk gjennomslag i det røde området ved 30 kV. Defekten er vist i Figur 4-14, den ligner den ene defekten som ble funnet tidligere i testobjekt 2-7. En tynn kanal med halvledermateriale som er presset inn i isolasjonsmaterialet.



Figur 4-14: Testobjekt 9, testserie 5.

Etter forsøkene ble det tatt mål av bunnen på flere råkopper, det viste seg at de var ca. 0,4 mm tykke istedenfor 0,3 mm. For å kompensere for dette ble det laget nye PE-plater som var 0,2 mm tykke, slik at total bunntykkelse ble 0,6 mm som ønsket.

4.1.4 Justering av tykkelse på PE-plate

Testserie 6

Det ble produsert ni nye testobjekt der tykkelsen på PE-platen var redusert til 0,2 mm. Det ble forsøkt med tre forskjellige skimstykkelser, resultatene er presentert i Tabell 4-8.

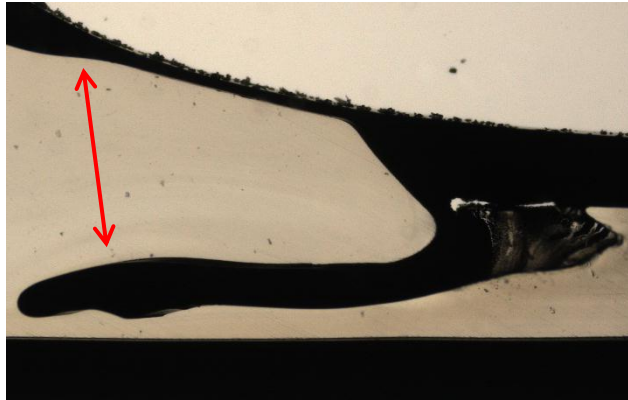
Tabell 4-8: Gjennomslagsverdier for testserie 6.

Testobjekt	Skimstykkelse	Gjennomslagsverdi
1	1,05 mm	15 kV
2	1,05 mm	20 kV
3	1,05 mm	15 kV
4	1,10 mm	15 kV
5	1,10 mm	10 kV
6	1,10 mm	15 kV
7	1,00 mm	15 kV
8	1,00 mm	15 kV
9	1,00 mm	10 kV

Som resultatene i Tabell 4-8 viser ble kvaliteten på testobjektene meget dårlige, det var ingen testobjekt som hadde en gjennomslagsverdi høyere enn 20 kV.

Testobjekt 3 og 4 fikk gjennomslag i det røde området ved 15 kV. Testobjekt 5 i Figur 9-11 i vedlegg D, viser hvilken type defekt som ble funnet i disse testobjektene. En liten ujevnhet i overgangen mellom materialene, der det er vanskelig å avføre om det er materialet fra halvlederen som trenger inn i isolasjonsmaterialet eller omvendt. Resultatet er som tidligere, en feltforsterkning fører til at testobjektet får gjennomslag ved langt lavere spenning enn det er designet for.

Testobjekt 2 fikk gjennomslag i det røde området ved 20 kV. Defekten er vist i Figur 4-13, det kan se ut som isolasjonsmaterialet har trengt inn i en liten sprekke i halvledermaterialet og separert de med nesten hele lengden av isolasjonen, resultatet er en isolasjonstykkelse som bare er en brøkdel av det den skal være.



Figur 4-15: Testobjekt 2, testserie 6.

Testobjekt 1, 5 og 7 fikk gjennomslag i det røde området ved 10-15 kV. Testobjekt 3 i Figur 9-12 i vedlegg D, viser hvilken type defekt som ble funnet i disse testobjektene. Defekten er meget lik den som ble funnet i testobjekt 9 fra testserie 5 (Figur 4-14), en tynn kanal med halvledermateriale som er presset inn i isolasjonsmaterialet.

Testobjekt 6, 8 og 9 fikk gjennomslag i det røde området ved 10-15 kV. Testobjekt 8 i Figur 9-13 i vedlegg D, viser hvilken type defekt som ble funnet i disse testobjektene. Det er en stor defekt der det ser ut til å være halvledermaterialet som trenger inn i isolasjonsmaterialet, samtidig er det en tynn kanal med halvledermaterialet som har utspring fra den store defekten og nesten strekker seg ned til den ytre halvlederen (rød pil). Defekten ligner den som ble funnet i testobjekt 9 fra testserie 1 (Figur 4-7) og testobjekt 1 fra testserie 5 (Figur 9-10 i vedlegg D).

Testobjektene med 0,2 mm tykke PE-plater har de samme typene defekter som testobjektene som ble laget med 0,3 mm tykke PE-plater, men gjennomslagsverdiene har steget ca. 5 kV i snitt på tross av 0,1 mm reduksjon i isolasjonstykkelse. Resultatene må derfor kunne sies å være bedre men fortsatt langt fra bra nok.

4.1.5 Justering av total isolasjonstykkelse

Testserie 7

Etter såpass mange gjennomslag ble det bestemt å skifte silikonoljen. For å spare tid ble det benyttet rampespenning under de videre målingene av gjennomslagsverdi.

Tidligere forsøk med tykkere bunn og uten PE-plate har gitt bra resultater. Det ble derfor bestemt å lage tre testobjekter uten PE-plate. For å kompensere for den manglende massen ble det brukt en skimstykkelse på 1,3 mm. Resultatene er presentert i Tabell 4-9.

Tabell 4-9: Gjennomslagsverdier for tre testobjekt uten PE-plate.

Testobjekt	Skimstykkelse	Gjennomslagsverdi
4	1,30 mm	14 kV
5	1,30 mm	20 kV
6	1,30 mm	15 kV

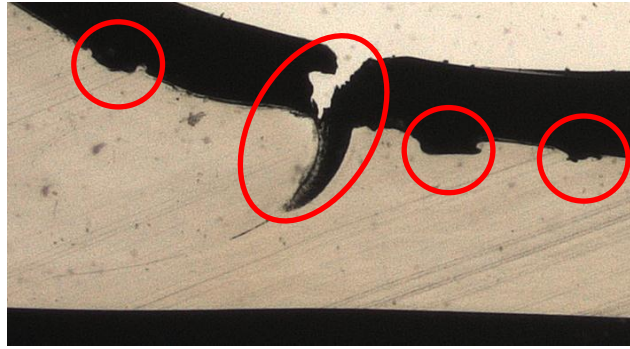
Alle testobjektene fikk gjennomslag i det røde området, mellom 14-20 kV. Testobjekt 4 har en ujevnhet lik den til testobjekt 2 fra testserie 1. Testobjekt 5 har en defekt lik den til testobjekt 7 fra testserie 1. Testobjekt 6 har flere ujevnheter der det ser ut som isolasjonsmaterialet trenger inn i halvledermaterialet, i tillegg til en tynn kanal med materiale fra den indre halvlederen som trenger inn i isolasjonsmaterialet vist i Figur 9-14 i vedlegg D.

De tre testobjektene som ble sammenstilt uten PE-plate hadde typiske defekter og fraværet av PE-platen hadde ingen nevneverdig effekt på ujevnheten. Det ble derfor produsert 6 nye testobjekt der bunnen var tykkere, for å undersøke om bunntykkelsen hadde innvirkning på ujevnheten. Det ble produsert tre testobjekt med vanlig bunntykkelse (0,4 mm) der det ble brukt en PE-plate som var 0,6 mm tykk, resultatene er presentert i Tabell 4-10.

Tabell 4-10: Gjennomslagsverdier for tre testobjekt, med 0,6 mm tykk PE-plate.

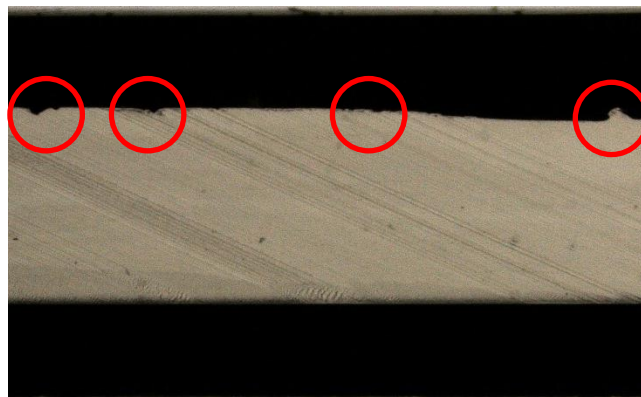
Testobjekt	Total bunntykkelse	Skimstykkelse	Gjennomslagsverdi
1	1,0 mm	0,60 mm	16 kV
2	1,0 mm	0,60 mm	30 kV
3	1,0 mm	0,60 mm	26 kV

Testobjekt 1 fikk gjennomslag i det røde området ved 16 kV. Det hadde flere ujevnheter av typen der det ser ut som halvledermaterialet trenger inn i isolasjonsmaterialet, som vist i Figur 4-16. Det er også mulig å se øvre del av gjennomslagskanalen, og det er rimelig å anta at defekten som kanalen har sitt utspring fra, er av samme type som de tre andre defektene.



Figur 4-16: Testobjekt 1, testserie 7.

Testobjekt 2 og 3 fikk gjennomslag i det grønne området ved henholdsvis 30 kV og 26 kV. Testobjekt 2 i Figur 4-17 viser hvilken type defekt som ble funnet i disse testobjektene. Ujevnhetene er av kjent karakter, det er både tegn på at halvledermaterialet trenger inn i isolasjonsmaterialet og motsatt. Forskjellen er at her forekommer de i det flate område.



Figur 4-17: Testobjekt 2, testserie 7.

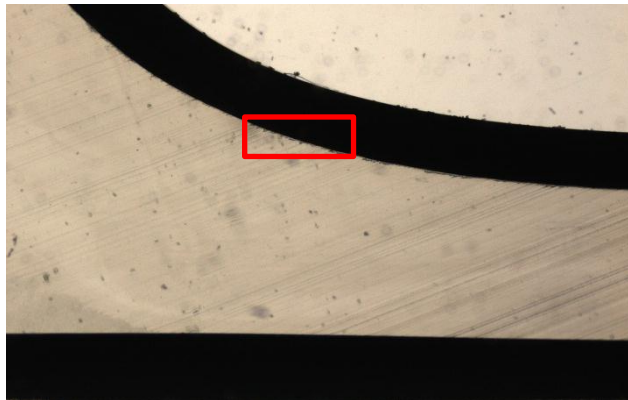
Det ble og produsert tre testobjekt uten PE-plate der bunnen på råkoppene var 1,3 mm tykk. Disse tre råkoppene var produsert separat, kun for å undersøke effekten av at den totale bunntykkelsen ble økt uten å være sammensatt av to komponenter. De tre råkoppene var og produsert av et annet materiale, LS4201S og resultatene er presentert i Tabell 4-11.

Tabell 4-11: Gjennomslagsverdier for tre testobjekt med 1,30 mm tykk bunn, uten PE-plate

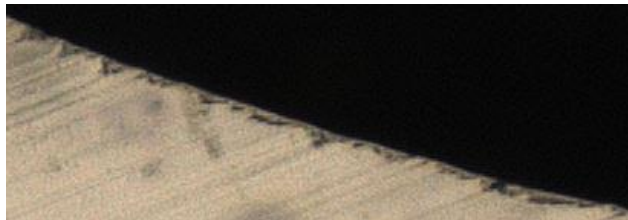
Testobjekt	Total bunntykkelse	Skimstykkelse	Gjennomslagsverdi
7	1,3 mm	0,25 mm	38 kV
8	1,3 mm	0,25 mm	14 kV
9	1,3 mm	0,25 mm	Overslag 74 kV

Testobjekt 7 og 8 fikk gjennomslag i det røde området ved henholdsvis 38 kV og 14 kV. Testobjekt 8 i Figur 9-15 i vedlegg D, viser hvilken type defekt som ble funnet i disse testobjektene. Defekten er av kjent karakter, materialet fra indre halvleder trenger inn i isolasjonsmaterialet og danner en spiss form. Dette gir feltforsterkning og testobjektet får gjennomslag ved mye lavere spenning enn det er designet for.

Testobjekt 9 fikk overslag ved 74 kV. Ved første øyekast ser det ut som om testobjektet er feilfritt, men ved nærmere undersøkelse ble det funnet små ujevnheter i grenseoverflaten. Dette er illustrert i Figur 4-19, som er en forstørrelse av det røde område i Figur 4-18.



Figur 4-18: Testobjekt 9, testserie 7.



Figur 4-19: Testobjekt 9, testserie 7. Forstørrelse av området merket rødt i Figur 4-18.

De tre testobjektene av råkopper med bunntykkelse lik 1,30 mm hadde i to tilfeller typiske defekter, mens ett testobjekt ble bra (ikke feilfritt) og fikk overslag. Siden ønsket bunntykkelse på testobjektet er 0,6 mm ble det bestemt ikke å gjøre ytterlige forsøk med tykk bunn.

De tre resterende råkoppene fra testserie 7 ble brukt i et forsøk på å jevne ut overflaten på råkoppene ved å plassere en PE-plate mellom råkoppene og den indre halvlederen før sammenstilling. Det var håp om at dette kunne forhindre ujevnheter da det viste seg at det sjelden ble ujevnheter mellom isolasjonen og den ytre halvlederen. Forsøket var mislykket og det var store ujevnheter i overflatene på alle tre testobjektene, de ble derfor ikke testet med spenning.

4.1.6 Nye PE-råkopper

Testserie 8

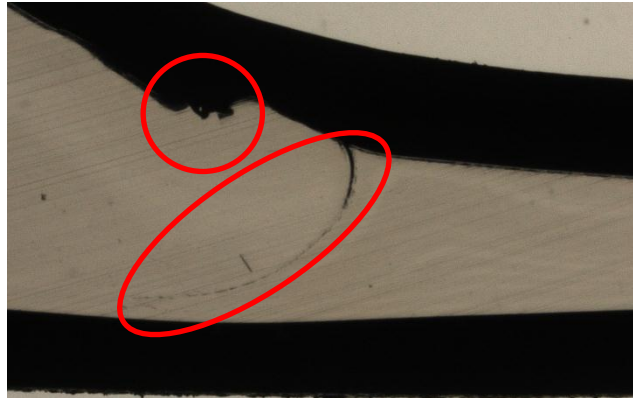
Etter syv testserier der det har vært gjort forsøk med skimstykking, halvledertykkelse, isolasjonstykking og temperatur er sannsynligheten stor for at feilkilden er ujevnheter i støpeformene som ble brukt til å produsere PE-råkopper. Siden det ikke er noen alternativ til disse støpeformene ble det bestemt å forsøke et tettemiddel (Frekote B-15) for å jevne ut eventuelle riper og hakk i støpeformene. Det måtte da produseres nye råkopper, og det ble bestemt å bytte til et annet isolasjonsmateriale (LS4201S), som ble benyttet i tidligere forsøk [11]. LS4201S har samme forventede holdfasthet (100 kV/mm) som LE4201.

Det ble produsert ni nye råkopper og de ble sammenstilt med tre forskjellige skimstykkinger. Resultatene er presentert i Tabell 4-12, og som den viser var de for det meste dårlige. Testobjektene med skimstykking 1,10 mm ga best resultater, et overslag og to gjennomslag som følge av meget små defekter.

Tabell 4-12: Gjennomslagsverdier for testserie 8.

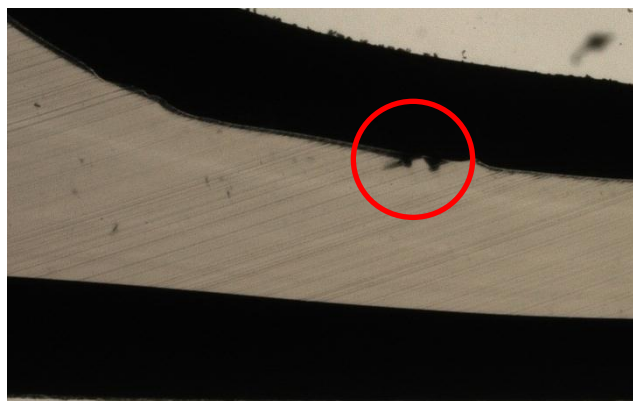
Testobjekt	Skimstykking	Gjennomslagsverdi
1	1,00 mm	9 kV
2	1,00 mm	23 kV
3	1,00 mm	15 kV
4	1,15 mm	22 kV
5	1,15 mm	12 kV
6	1,15 mm	35 kV
7	1,10 mm	Overslag 66 kV
8	1,10 mm	30 kV
9	1,10 mm	39 kV

Testobjekt 1, 3 og 5 fikk gjennomslag i det røde området mellom 9-15 kV. Testobjekt 1 i Figur 4-20 viser hvilken type defekt som ble funnet i disse testobjektene. Defekten er av typen som kjennetegnes ved at halvleder materialet trenger inn i isolasjonen og danner skarpe kanter, det er og en defekt av typen der halvleder materialet danner en lang tynn kanal inn i isolasjonen.



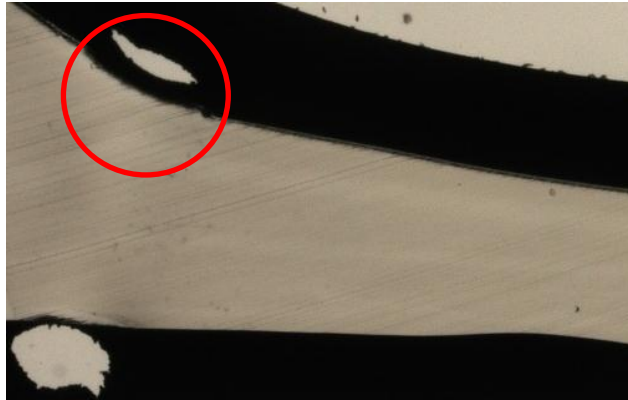
Figur 4-20: Testobjekt 1, testserie 8.

Testobjekt 2 og 4 fikk gjennomslag i det røde området ved henholdsvis 23 kV og 22 kV. Testobjekt 4 i Figur 4-21 viser hvilken type defekt som ble funnet i disse testobjektene. Defektene er små deler av halvledermaterialet som trenger ned i isolasjonen og gir feltforsterkning.



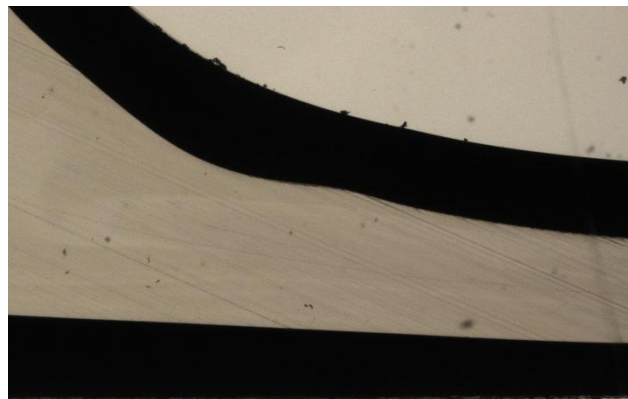
Figur 4-21: Testobjekt 4, testserie 8.

Testobjekt 6, 8 og 9 fikk gjennomslag i det røde området mellom 30-39 kV. Testobjekt 8 i Figur 4-22 viser hvilken type defekt som ble funnet i disse testobjektene. Det er vanskelig å avgjøre om det er materialet fra indre halvleder som trenger inn i isolasjonsmaterialet eller omvendt, men det forekommer i langt mindre grad enn det gjorde i for eksempel testobjekt 2 og 4. Noe som reflekteres av gjennomslagsverdiene.



Figur 4-22: Testobjekt 8, testserie 8.

Testobjekt 7 fikk overslag ved 66 kV. Som vist i Figur 4-23 er ikke testobjektet feilfritt. Overgangen mellom indre halvleder og isolasjon er ujevn, men grenseflaten er glatt så det vil være minimal feltforsterkning. Og som nevnt før hadde det vært mulig å masseprodusere kopper med denne kvaliteten ville det sannsynligvis vært godt nok for å kunne undersøke partikkelforurensninger.



Figur 4-23: Testobjekt 7, testserie 8.

Resultatene fra forsøkene etter at tettemiddelet ble påført er ikke bra. Skimstykkelsen på 1,10 mm skiller seg ut som noe bedre enn alternativene men det er fortsatt ikke godt nok og testobjektene har fremdeles defekter der det tyder på at en svakhet i isolasjonsmaterialet tillater halvledermaterialet å trenge inn.

4.2 Måling av partielle utladninger

Målingene av partielle utladninger (PD) ble gjort som beskrevet i kapittel 3.2.2 med måleutstyret som er vist i Figur 3-12.

Ideelt sett skal man kunne finne begynnelsesspenningen og slukkespenningen, uten at det blir gjennomslag i testobjektet. Men på grunn av støy ble det gjennomslag i mange av testobjektene før det var mulig å se PD. I testobjektene der det ikke ble gjennomslag ved målingen av PD, ble gjennomslagsspenningen målt etter at målekretsen (for PD) hadde blitt fjernet.

Testserie 1

Testserie 1 ble tilsatt ubehandlede partikler, altså partikler uten heftemiddel eller slippmiddel. Det ble benyttet tre forskjellige skimstykkeleser. Resultatene er presentert i Tabell 4-13.

Tabell 4-13: Resultater for måling av PD, U_b – begynnelsesspennning, U_s – slukkespenning, U_g - gjennomslagsverdien.

Testobjekt	Skimstykkeleser	U_b	U_s	U_g	Gjennomslagspunkt
1	1,00 mm	8,5 kV	4,6 kV	6,6 kV	Rødt
2	1,00 mm	7,0 kV	3,8 kV	7,4 kV	Rødt
3	1,00 mm	17,5 kV	-	17,5 kV	Rødt
4	1,10 mm	-	-	16,5 kV	Grønt
5	1,10 mm	-	-	44,0 kV	Grønt
6	1,10 mm	10,0 kV	-	8,9 kV	Grønt
7	0,90 mm	8,5 kV	3,5 kV	8,0 kV	Rødt
8	0,90 mm	7,5 kV	3,7 kV	13,2 kV	Rødt
9	0,90 mm	14,2 kV	7,3 kV	17,3 kV	Rødt

- Testobjekt 1, 2, 7, 8 og 9 nådde begynnelsesspennning og slukke spenning. Gjennomslagsverdien ble målt individuelt. Begynnelsesspenningen og slukkespenningen til testobjekt 2 er vist i henholdsvis Figur 9-16 og Figur 9-17 i vedlegg E.
- Testobjekt 3 nådde begynnelsesspennning og fikk gjennomslag momentant etter. Begynnelsesspenningen er vist i Figur 9-18 i vedlegg E.
- Testobjekt 4 og 5 fikk gjennomslag mens spenning var på veg opp uten tegn til PD.
- Testobjekt 6 nådde begynnelsesspennning og fikk gjennomslag mens spenningen var på veg ned. Begynnelsesspenningen er vist i Figur 9-19 i vedlegg E.

Testserie 2

Testserie 2 ble ikke tilsatt partikler, og var ment som en referanseserie. Da målingene av testserie 1 ble dårlige og det var lite tid, ble det prioritert å teste en ny serie med ubehandlede partikler.

Testserie 3

Testserie 3 ble tilsatt ubehandlede partikler, altså partikler uten heftemiddel eller slippmiddel. Det ble benyttet tre forskjellige skimstykkeleser. Resultatene er presentert i Tabell 4-14.

Tabell 4-14: Resultater for måling av PD, U_b – begynnelseesspenning, U_s – slukkespenning, U_g - gjennomslagsverdien.

Testobjekt	Skimstykkeleser	U_b	U_s	U_g	Gjennomslagspunkt
1	1,10 mm	-	-	60,5 kV	Rødt
2	1,10 mm	-	-	29,0 kV	Rødt
3	1,10 mm	-	-	15,5 kV	Rødt
4	1,20 mm	-	-	13,2 kV	Grønt
5	1,20 mm	13,1 kV	-	13,1 kV	Grønt
6	1,20 mm	11,4 kV	-	11,2 kV	Grønt
7	1,15 mm	23,5 kV	-	23,5 kV	Grønt
8	1,15 mm	20,0 kV	-	20,0 kV	Rødt
9	1,15 mm	14,3 kV	-	14,3 kV	Grønt

- Testobjekt 1-4 fikk gjennomslag på veg opp uten tegn til PD.
- Testobjekt 5, 7, 8 og 9 nådde begynnelseesspenning og fikk gjennomslag momentant etter. Begynnelseesspenningen til testobjekt 5 er vist i Figur 9-20 i vedlegg E.
- Testobjekt 6 nådde begynnelseesspenning og fikk gjennomslag mens spenningen var på veg ned. Begynnelseesspenningen er vist i Figur 9-21 i vedlegg E.

5 Diskusjon

5.1 Feilsøking

I arbeidet med å finne feilkilden som fører til at testobjektene blir defekte ble det gjort flere forandringer, hovedsakelig i fremgangsmåten for produksjon av testobjekter.

Det første som ble forandret var skimstykkelser, den ble i første omgang redusert med 0,05 mm. Dette ga ingen forandring i gjennomslagsverdiene og defektene i overgangen mellom materialene forekom uavhengig av skimstykkelser.

En mulig feilkilde er at det er svakheter i enten overflaten til PE-råkoppen, den indre halvlederen eller begge som gir ujevnheter. Om dette stemmer ville disse svakhetene måtte ha kommet fra ujevnheter (riper, hakk) i støpeformene. Det ble produsert indre halvledere i en annen type støpeformer som ikke var like slitt som de originale støpeformene. Men dette ga heller ingen betydelig forandring i gjennomslagsverdiene, og defektene som ble funnet var fortsatt av samme karakter som før. Det viste seg senere at halvlederne som ble produsert i disse støpeformene ble 0,6 mm tykke istedenfor 0,5 mm.

For å redusere faren for at tilfeldigheter skal påvirke feilsøkingen og for å kunne gjøre en bedre vurdering ble det produsert ni nye testobjekter (med ny type halvleder), der skimstykkelser var lik i alle testobjektene. Resultatene fra disse forsøkene var varierende, fire av testobjektene hadde en type defekt og tre av disse fikk overslag ved spenningsnivået de var designet for. De resterende fem hadde en annen type defekt og fikk gjennomslag ved langt lavere spenning enn de var designet for. Da det var tegn på at det hadde vært trangt under sammenstillingen i flere av testobjektene ble halvlederne som var produsert med den nye typen støpeformer kontrollmålt og det viste seg at de var 0,6 mm tykke istedenfor 0,5 mm.

Det ble produsert ni nye testobjekt med indre halvleder av den nye typen med rett tykkelse. Resultatet ble tilsynelatende meget dårlig, med mye kraterliknende ujevnheter på overflaten til samtlige testobjekt. Det er tidligere påvist sammenheng mellom denne typen ujevnheter og defekter i grenseflaten mellom materialene. Er defektene som finnes i grenseflaten av en viss størrelse og karakter vil de også gi utslag på overflaten av testobjektet [11]. De ble derfor ikke testet med spenning.

Det ble forsøkt å produsere ni nye testobjekt med økt skimstykkelser. Men resultatet ble som forsøket før, med tydelige ujevnheter i overflaten av testobjektet. Det ble derfor ikke utført målinger på disse testobjektene heller.

Det ble produsert en serie med testobjekt der temperaturinnstillingene til pressa ble forandret basert på en SINTEF produksjonsmanual [10]. Resultatene ble dårlige, samtlige gjennomslagsverdier var mye lavere enn spenningsnivået testobjektene er designet for. Defektene som ble funnet i testobjektene var av samme karakter som tidligere forsøk, men av større dimensjoner sannsynlig grunnet økt termisk utvidelse.

Etter å ha funnet at bunnen i PE-råkoppene var 0,4 mm tykk istedenfor 0,3 mm ble det produsert ni nye testobjekt der PE-platen var 0,2 mm for å kompensere. Men også her ble testresultatene dårlige og defektene er av samme karakter som i tidligere forsøk.

Det ble produsert ni nye testobjekter, tre kopper av henholdsvis 0,4 mm, 1,0 mm og 1,3 mm total isolasjonstykkelse. Resultatene fra testobjektene med 0,4 mm og 1,0 mm tykkelse var meget dårlige. Resultatene fra testobjektene med 1,3 mm tykkelse var noe bedre, et av testobjektene fikk overslag. De to andre fikk riktignok gjennomslag, men defektene var av ukjent årsak mindre i dimensjon. Det ble likevel ikke gjort flere forsøk med økt bunntykkelse da det er 0,6 mm som er den ønskede tykkelsen til forsøkene med partikler.

Siden det ikke er noen alternativer til støpeformene som benyttes til støping av PE-råkoppene ble det gjort et forsøk på å utbedre de formene som var tilgjengelige ved å benytte et tettemiddel. De ble så benyttet til å produsere ni nye PE-råkopper og til å sammenstille disse til testobjekter. Det ble forsøkt med tre forskjellige skimstykkelser. Skimstykkelsen på 1,10 mm skiller seg ut som noe bedre enn alternativene, men testobjektene har fremdeles defekter av samme karakter som har blitt funnet gjennom hele feilsøkingprosessen.

5.2 Måling av partielle utladninger

Defektene i testobjektene fører til gjennomslag ved lavere spenningsnivå enn det testobjektene er designet for å motstå. I de fleste tilfellene der det har blitt produsert testobjekt med partikler i tidligere forsøk ble det gjennomslag i defektene uavhengig om de var ubehandlet, behandlet med slippmiddel eller behandlet med heftemiddel [11]. Det er altså ikke mulig å teste om heftemiddelet har noen effekt ved å utføre gjennomslagsmålinger.

Som et alternativ ble det forsøkt å måle partielle utladninger (PD). Basert på hvordan utladninger forekommer i hulrom (kapitel 2.3.1) var det håp om at det kunne være mulig å skille PD målingene i et testobjekt med hulrom fra et uten hulrom.

Det ble produsert tre testserier, to med ubehandlede partikler og en referanseserie uten tilsatte partikler. Testresultatene fra den første serien med ubehandlede partikler var varierende, tre testobjekter fikk gjennomslag i området med partikler, mens seks partikler fikk gjennomslag i kanten av testobjektet. Det var ikke mulig å påvise noen forskjeller i PD målingene til de testobjektene som fikk gjennomslag i området med partikler og de som fikk gjennomslag i kanten av testobjektet. Det var kun i målingene til et testobjekt det var mulig å påvise et avvik, men her er verken gjennomslagsnivå eller gjennomslagspunkt unikt.

Testresultatene fra den andre serien med ubehandlede partikler var noe dårligere enn den første. Fem testobjekter fikk gjennomslag i området med partikler, mens fire partikler fikk gjennomslag i kanten av testobjektet. Og heller ikke her var det mulig å påvise noen forskjeller i PD målingene til de testobjektene som fikk gjennomslag i området med partikler og de som fikk gjennomslag i kanten av testobjektet. Det kan tyde på at defektene også skaper problemer for PD målinger, det ble derfor prioritert å fortsette feilsøkingen.

6 Konklusjon

6.1 Feilsøking

Feilsøking på testobjekter opptok en stor del av prosjektperioden og det kan konkluderes med at ujevnheter i grenseoverflaten mellom indre halvleder og isolasjonsmaterialet medfører gjennomslag ved langt lavere påtrykt spenning enn det isolasjonssystemet er designet for å motstå.

Når det gjelder feilkilder er det ennå ikke mulig å konkludere med noe, selv om høy mekanisk belastning på overflaten ved produksjon av råkopper virker som en sannsynlig feilkilde. Dette kommer høyst sannsynlig fra små ujevnheter (riper, hakk) i overflaten på støpeformene som følge av slitasje.

6.2 Måling av partielle utladninger

Det ble ikke nok tid til å gjennomføre tilstrekkelig med målinger av PD. Det er og få test-resultater fra de målingene som ble gjennomført, sannsynligvis grunnet de samme defektene som forhindrer måling av gjennomslagspenning. Det kan derfor ikke konkluderes med om heftemiddelet har noen effekt basert på PD målingene.

7 Forslag til videre arbeid

Videre feilsøking på testobjekter og utbedring/utskifting av støpeformer

Et viktig videre arbeid etter dette prosjektet er å fastslå årsaken til hvorfor overgangen mellom indre halvleder og isolasjonsmaterialet blir ujevn ved sammenstilling. Om det er overflaten til støpeformene som er problemet slik det peker mot, må disse utbedres eller utskiftes.

Levetidskurver

Det er i dette prosjektet gjennomført to forsøk med tanke på holdfasthet, rampespenning og stegspenning. Det ville og vært interessant å se på hvordan testobjektene holder mot en fast spenning over lengere tid.

Nanokompositter

Feilsøking av testobjektene opptok så mye av tiden i dette prosjektet at det ikke ble tid til å forsøke med nanokompositter, så det er fortsatt en spennende mulighet.

Måling av partielle utladninger på behandlede partikler

For å oppnå mer informasjon om den eventuelle effekten til et heftemiddel er ytterligere måling av partielle utladninger en god metode.

8 Referanser

- [1] Erling Ildstad, *Electric Power Engineering – TET4160 High Voltage Insulating Materials*. Trondheim, Norway: NTNU, Faculty of Information Technology, Mathematics and Electrical Engineering, Department of Electric Power Engineering, 2010.
- [2] Erling Ildstad, *TET4195 High Voltage Equipment – Cable Technology*. Trondheim, Norway: NTNU, Faculty of Information Technology, Mathematics and Electrical Engineering, Department of Electric Power Engineering, 2009.
- [3] F.H. Kreuger, *Industrial High DC Voltage*. Delf, The Netherlands: Delf University Press, 1995.
- [4] F.H. Kreuger, *Industrial High Voltage – Vol. II*. Delf, The Netherlands: Delf University Press, 1992.
- [5] L.A. Dissado and J.C. Fothergill, *Electrical Degradation and Breakdown in Polymers*. London, United Kingdom: The Institution of Engineering and Technology, 1992.
- [6] Hallvard Faremo, *Partielle utladninger- Begreper, måleteknikk og mulige anvendelser for tilstandskontroll*. Trondheim, Norway: SINTEF, Power Technology, 1996.
- [7] Knut Dahle Hammervoll, *Ikke-destruktiv tilstandskontroll av kabelskjøter i distribusjonsnett*. Trondheim, Norway: NTNU, Faculty of Information Technology, Mathematics and Electrical Engineering, Department of Electric Power Engineering, 2010.
- [8] E. Kuffel, W.S. Zaengl and J. Kuffel, *High Voltage Engineering: Fundamentals, 2nd ed.* Oxford, United Kingdom: Butterworth Heinemann, 2000.
- [9] B. Haworth, C.L. Raymond and I. Sutherland, *Polyethylene Compounds Containing Mineral Fillers Modified by Acid Coatings*. Leicestershire, United Kingdom: Loughborough University, Institute of Polymer Technology and Materials Engineering, Department of Chemistry.
- [10] Hallvard Faremo, *The EFI Test Method – Wet Ageing of High Voltage Materials*. Trondheim, Norway: SINTEF, Power Technology, 1994.
- [11] Thomas Fjeld Johannessen, *Improvement of cohesion between contaminants and XLPE insulation*. Trondheim, Norway: NTNU, Faculty of Information Technology, Mathematics and Electrical Engineering, Department of Electric Power Engineering, 2011.

9 Vedlegg

Vedlegg A – Plassering av partikler

Figur 9-1 viser et bilde av sentrumet til overflaten på en PE-plate som har blitt pålagt partikler, bildet er tatt med et kamera tilkoblet et mikroskop.



Figur 9-1: Plassering av partikler på overflaten av PE-platen.

Figur 9-2 viser et 0,25 mm snitt av bunnen til et testobjekt, der en tilsatt partikkel er omgitt av isolasjon. Bildet er tatt med et kamera tilkoblet et mikroskop.



Figur 9-2: Partikkel omgitt av isolasjon.

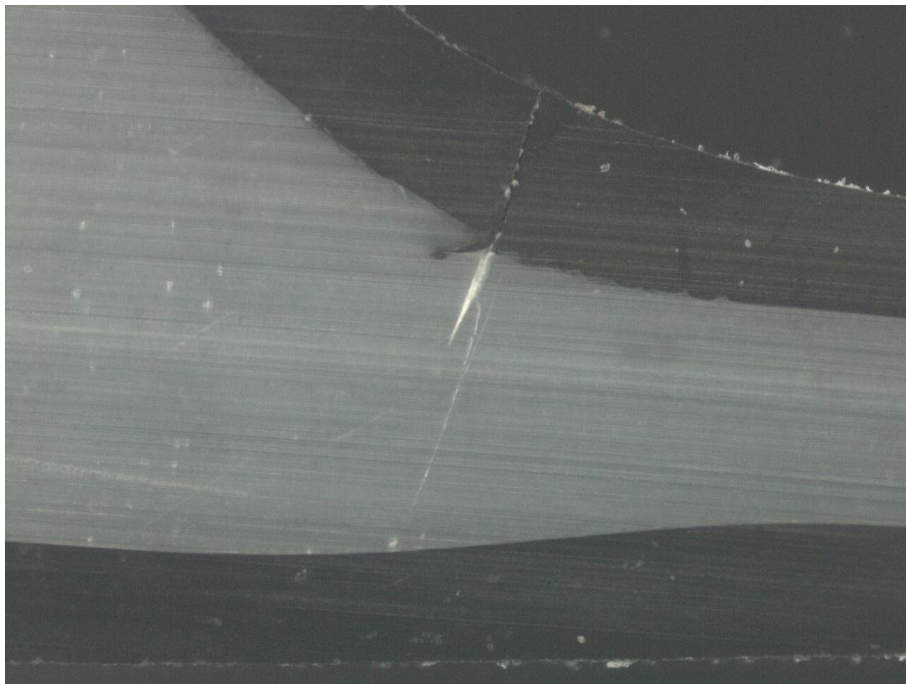
Vedlegg B – Utstyrsliste

Type	Labnr.	Betegnelse
LIKERETTER LADER	B02-0296	Variac
MULTIMETER DIG	S03-0370	Voltmeter
SKOP DIG 4KANAL MIXED	G04-0353	Osc.
SPOLE HØYSP	-	L_{komp}
TRAFO HØYSP 1FAS	B01-0424	Transformator
KONDENSATOR HØYSP	-	C_K
SHUNT UTLADNINGER	I06-0074	Z_M

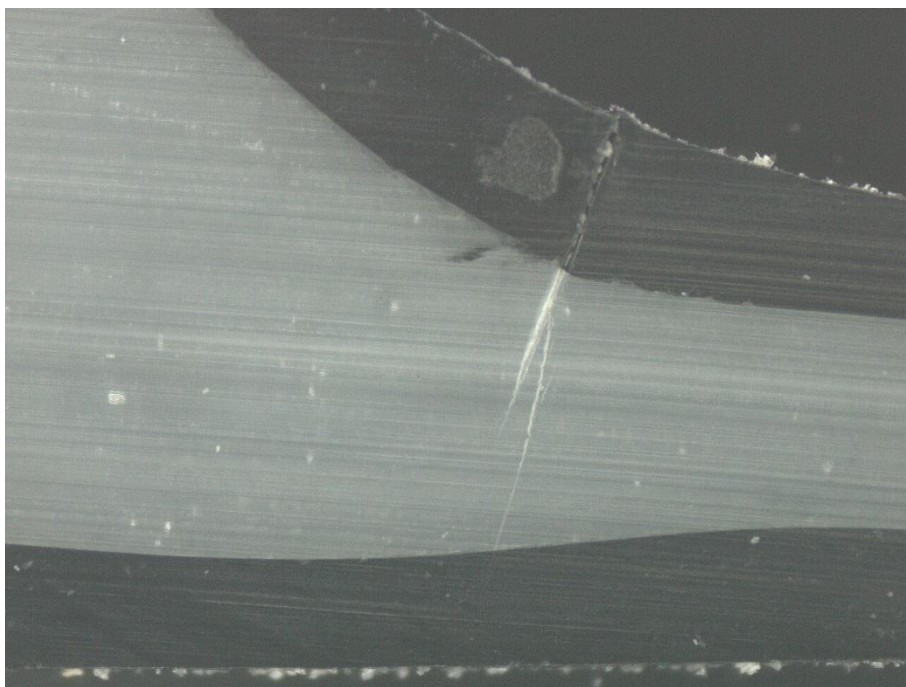
Vedlegg C – Mikroskopanalyse

Eksempel på gjennomslag som følge av ujevn grenseflate.

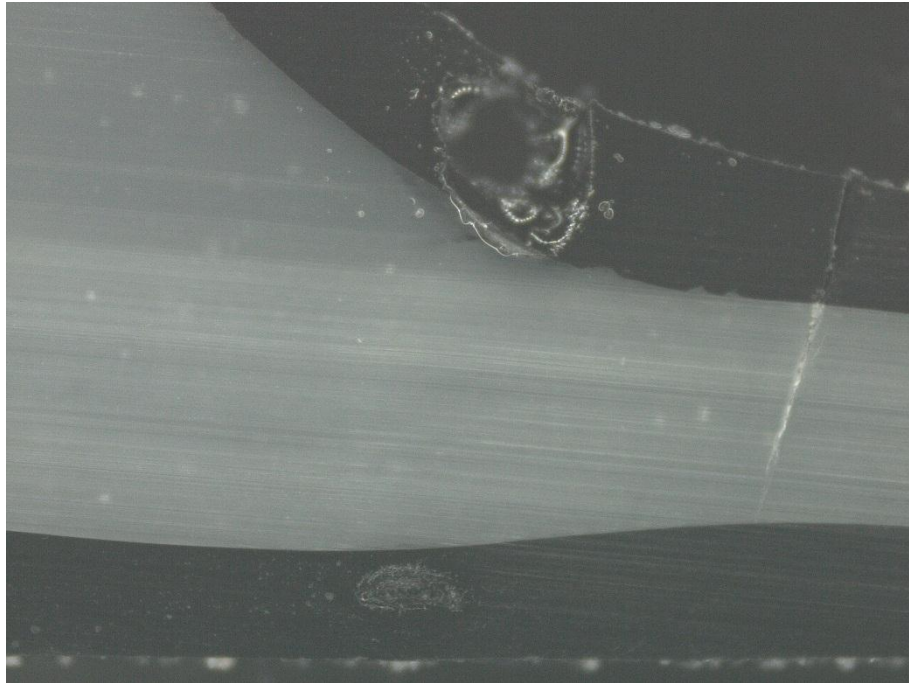
Eksempel på hvordan en ujevn grenseflate mellom indre halvleder og isolasjonsmaterialet fører til gjennomslag.



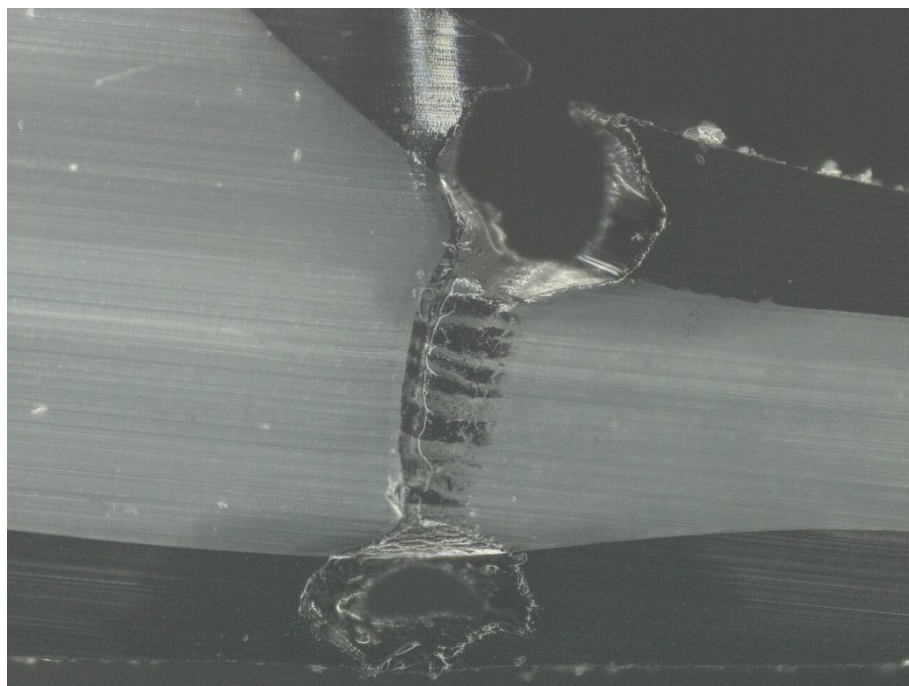
Figur 9-3: Tre snitt a 0,25 mm før gjennomslag.



Figur 9-4: To snitt a 0,25 mm før gjennomslag.



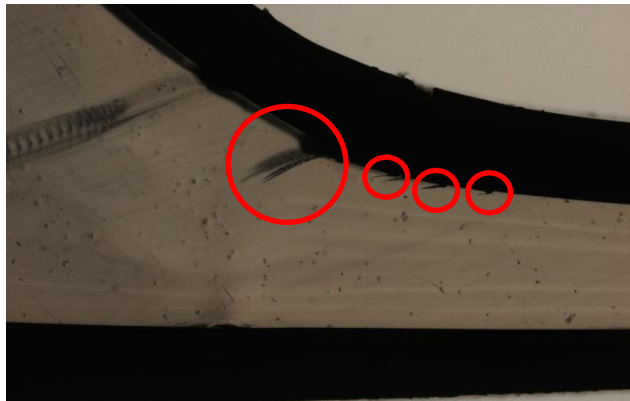
Figur 9-5: Et snitt a 0,25 mm før gjennomslag.



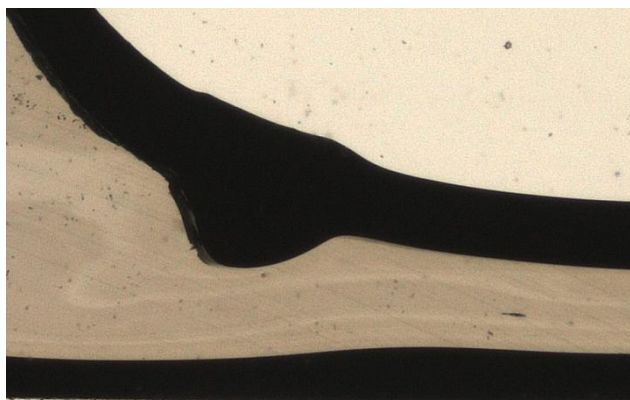
Figur 9-6: Snitt ved gjennomslag.

Vedlegg D – Resultater fra feilsøking

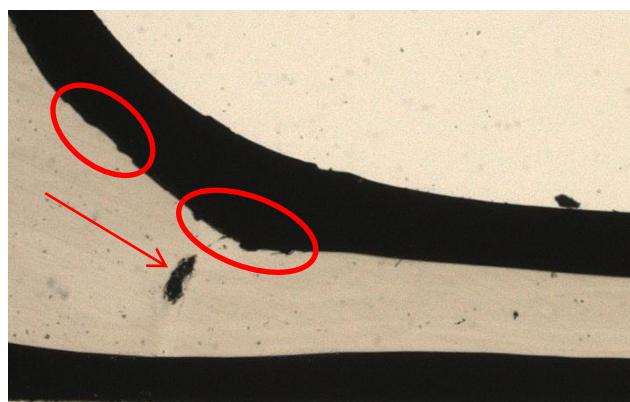
Figurene viser et snitt a 0,25 mm av det aktuelle testobjektet.



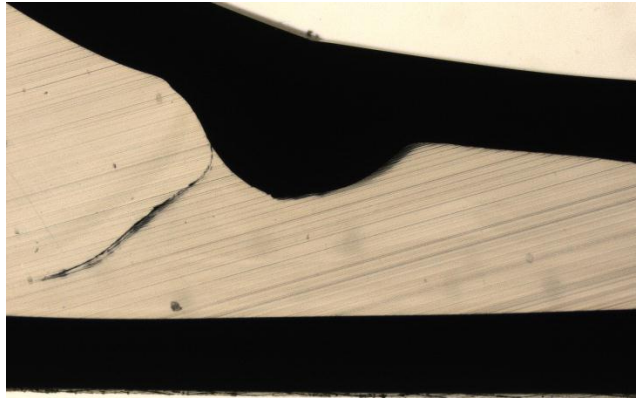
Figur 9-7: Testobjekt 2, testserie 1.



Figur 9-8: Testobjekt 8, testserie 2.



Figur 9-9: Testobjekt 9, testserie 2.



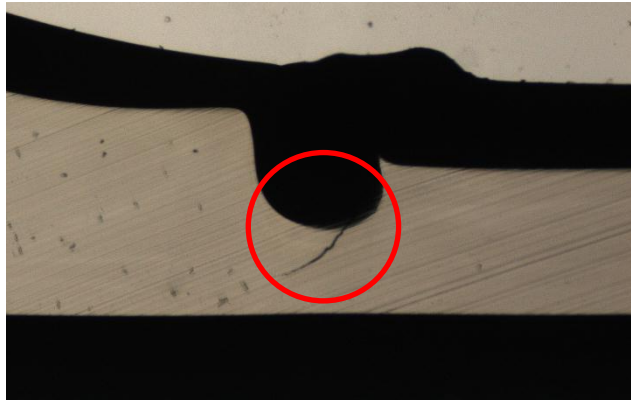
Figur 9-10: Testobjekt 1, testserie 5.



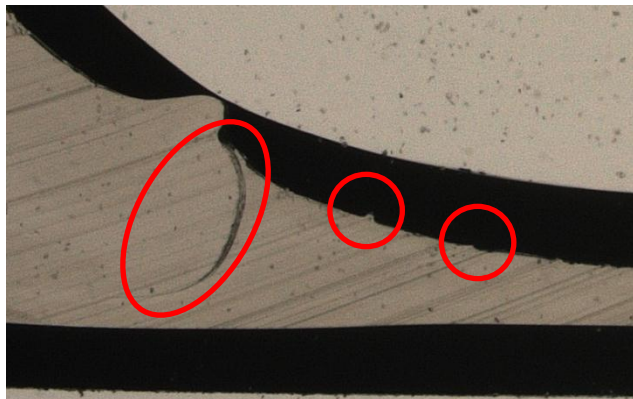
Figur 9-11: Testobjekt 5, testserie 6.



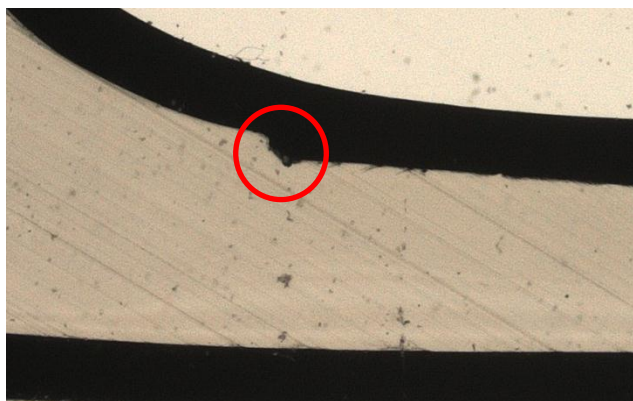
Figur 9-12: Testobjekt 3, testserie 6.



Figur 9-13: Testobjekt 8, testserie 6.



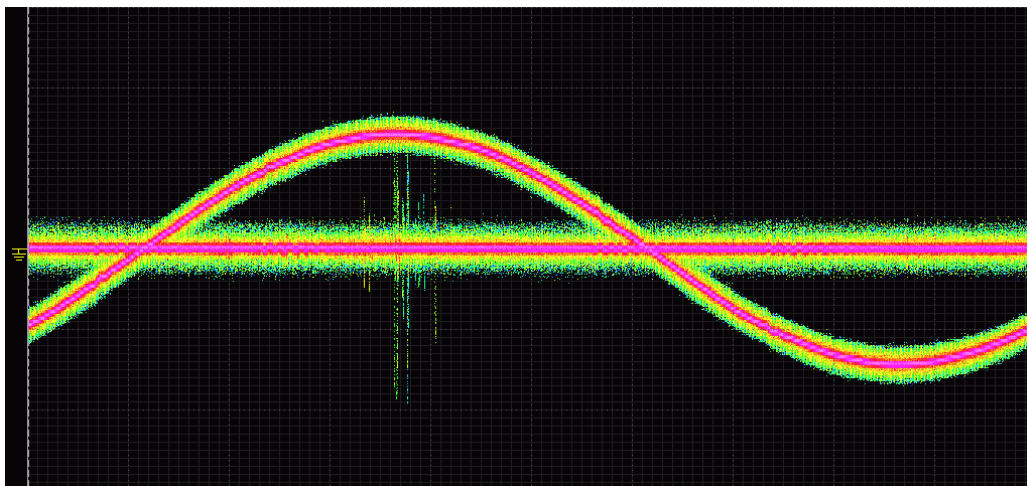
Figur 9-14: Testobjekt 6, testserie 7.



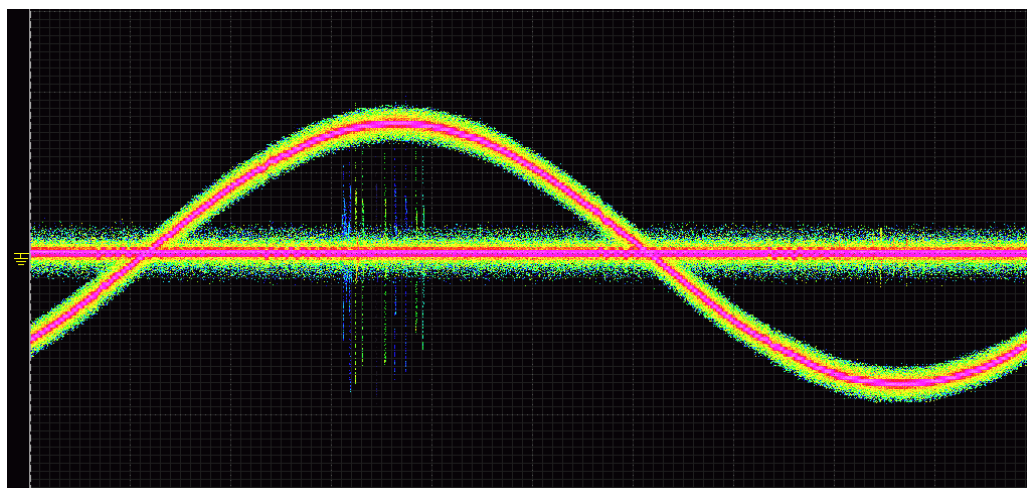
Figur 9-15: Testobjekt 8, testserie 7.

Vedlegg E – Resultater fra PD målinger

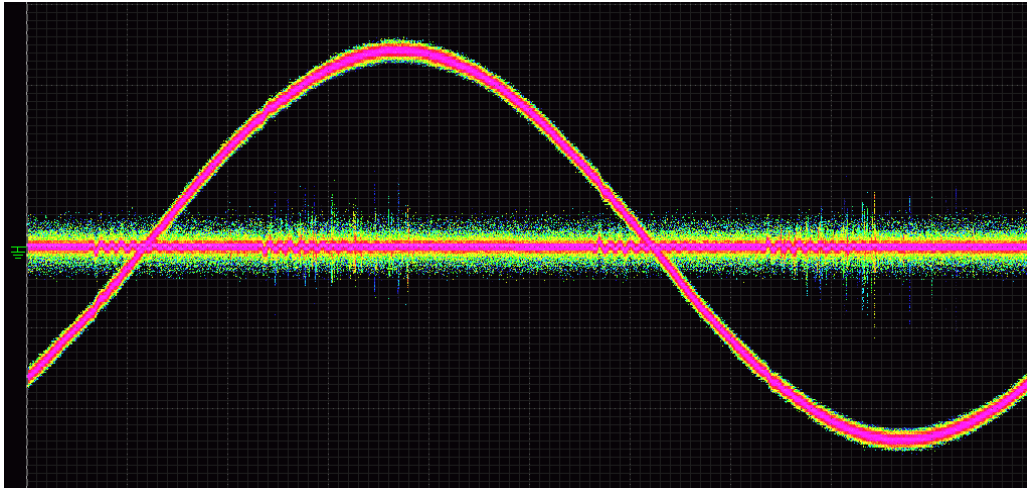
Figurene viser skjermdump fra oscilloskopet under måling av PD. X-aksen er spenning og y-aksen er tid, der en periode er 20 ms.



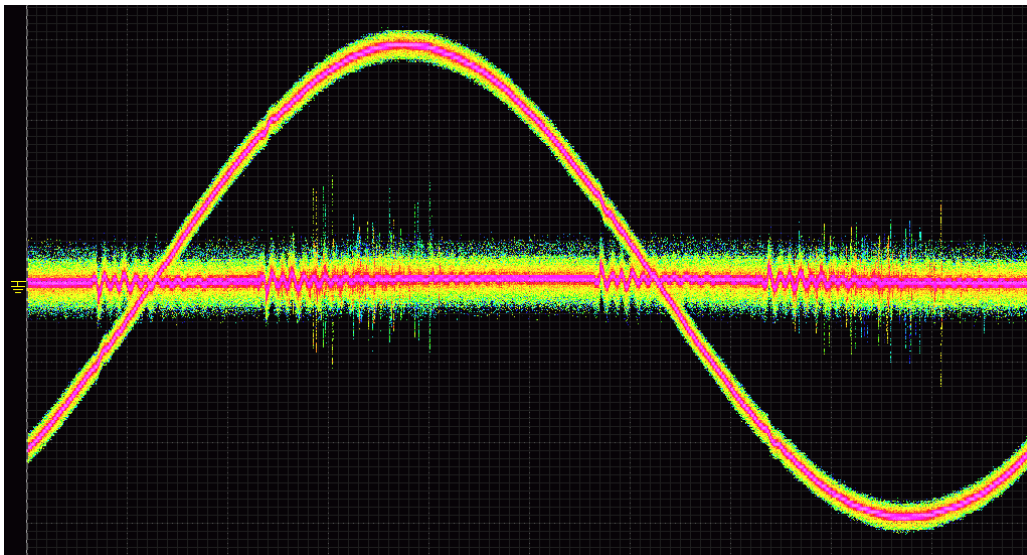
Figur 9-16: Begynnelsesspenning ved 7,0 kV i testobjekt 2 fra testserie 1.



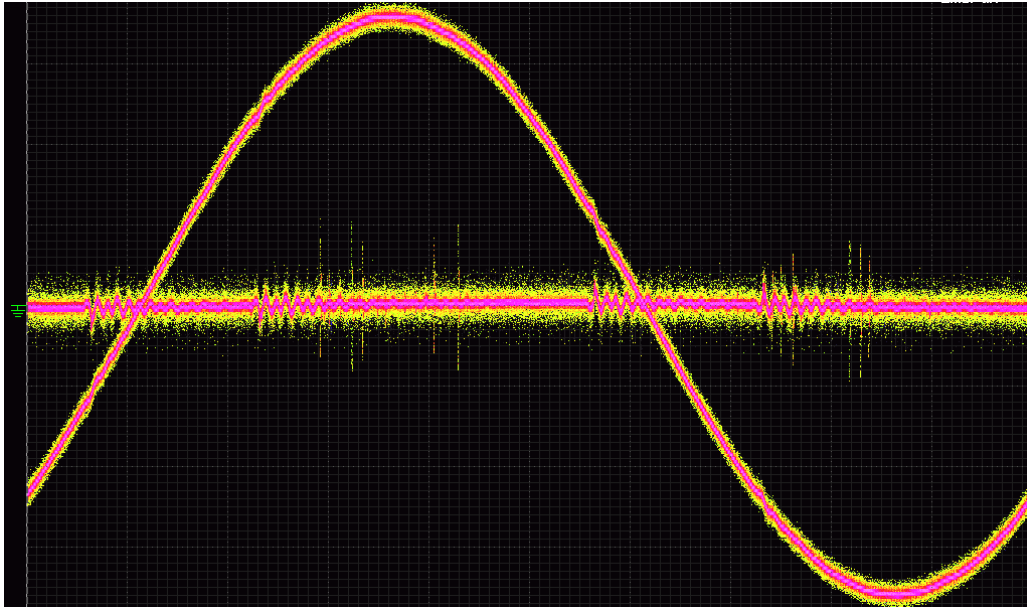
Figur 9-17: Slukkespenning ved 3,8 kV i testobjekt 2 fra testserie 1.



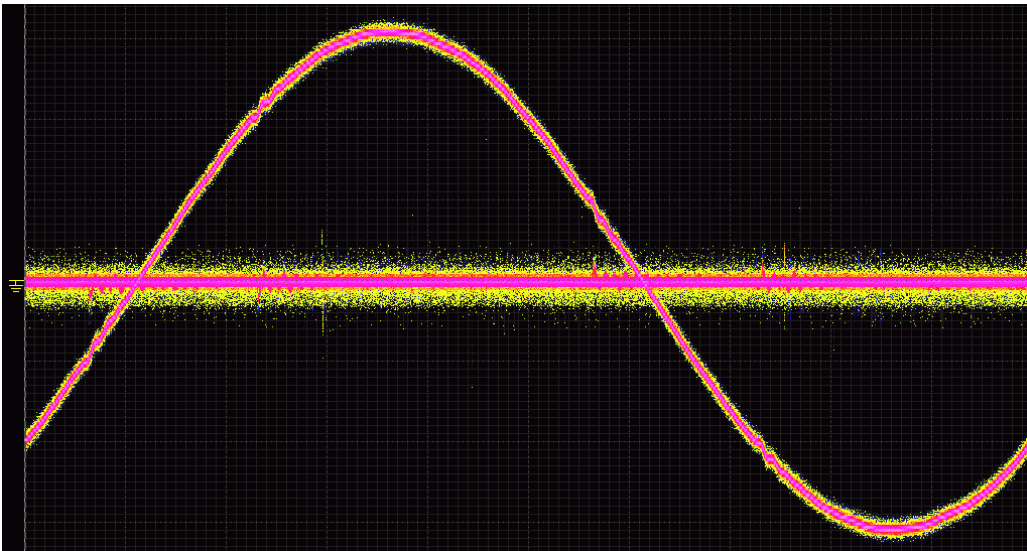
Figur 9-18: Begynnelseesspenning ved 17,5 kV i testobjekt 3 fra testserie 1.



Figur 9-19: Begynnelseesspenning ved 10,0 kV i testobjekt 6 fra testserie 1.



Figur 9-20: Begynnelseesspenning ved 13,1 kV i testobjekt 5 fra testserie 2.



Figur 9-21: Begynnelseesspenning ved 11,4 kV i testobjekt 6 fra testserie 2.