

Utvikling av testmetoder for fiberoptisk sjøkabel med DC-drevne forsterkere

AC holdfasthets-testing

Espen Aas Sviland

Master i energi og miljø

Innlevert: juni 2014

Hovedveileder: Frank Mauseth, ELKRAFT

Medveileder: Sverre Hvidsten, SINTEF Energi AS

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Institutt for elkraftteknikk

Oppgavetekst

“Repeatered Optical Cables (ROC) are used for fiber optic communication up to 10 000 km and down to 8 000 m depth. The cable is consist of a conductor with integrated fiber optic cable. The cables operates at 10 kV DC, supplying the repeaters needed to amplify the fiber optic signals. The cable has no inner or outer semiconductor and the cable insulation is directly subjected to the sea water. The ROC cable is also used supplying power to subsea installations.

Currently there is no standards describing how to test such cables. The test methods should take relevant stresses, defects and service conditions into consideration.

The project work will mainly be experimental. The main purpose is to simulate possible defects in such a cable and investigate their effect on the cable lifetime.

A summer job at Nexans Norway, Oslo, is also offered in connection to the student project.”

Forord

Denne hovedoppgaven er skrevet ved Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet i samarbeid med Nexans Norway AS, avdeling Hybrid Underwater Cables (HUC). Arbeidet gransker holdfastheten til isolasjonsmaterialet på en fiberoptisk sjøkabel med forsterkere.

Arbeidet har innbåret mye praktisk arbeid med bratt læringskurve, og det er tilbragt vel så mange timer i laboratoriet som foran datamaskinen.

Først og fremst vil jeg takke førsteamanuensis Frank Mauseth for å ha vært en tilstedeværende og behjelpelig veileder.

Jeg vil også takke biveileder Sverre Hvidsten for gode råd og hjelp til å tenke fremover.

Takk til Hans Helmer Sæternes og Jorunn Hølto på Sintef, for deres tålmodige laboratorie-opplæring av undertegnede.

Hjertelig takk til Erlend Andersen og Bjart-Are Steinsland for god oppfølging, og alle de på Helfsyr som har gjort det veldig hyggelig å dra på besøk dit.

Trondheim, 12. juni 2014



Espen Aas Sviland

Sammendrag

Fiberoptiske sjøkabler benyttes for sin store kapasitet og raske signaloverføring. Ved store avstander svekkes lyssignalet i fiberoptikken, slik at det må forsterkes ved gitte intervaller. Nexans' ROC-2 benytter aktive forsterkere som drives av 10 kV likespenning. Dette stiller krav til kabelens elektriske holdfasthet. Passende spenningstester skal verifisere at kabelen ikke havarerer innen sin angitte levetid. Foreløpig finnes det ikke et godt grunnlag for å bestemme slike tester for ROC-2.

For å kunne verifisere kabelens levetid, må en undersøke kabelens svake punkter. Elektrisk nedbrytning i polymerer har som regel sitt utspring i defekter eller urenheter i materialet. I foregående arbeid er det funnet flere tilfeller av oksiderte partikler i ROC-2 kabellengder. Slike partikler kan ha høyere permittivitet og konduktivitet enn ualdret plastmateriale, og dermed forårsake høye lokale feltkonsentrasjoner i isolasjonen. Dette arbeidet har derfor som hensikt å undersøke innvirkningen av oksiderte partikler på materialets elektriske holdfasthet.

0,25 mm tykke plater av isolasjonsmaterialet ble aldret i 480 timer for å oppnå en høy grad av oksidering. Materialet ble så knust til partikler i størrelsesorden 100-200 μm . Partiklene ble støpt inn i Rogowski koppobjekter, og påtrykt rampet AC-spenning til gjennomslag. Som referanser ble det også testet helstøpte objekter uten partikler, objekter kun med grensesjikt i midten og objekter med innstøpte metallpartikler. Halvparten av koppene ble oppfuktet for å undersøke sammenhengen mellom fukt og holdfasthet.

Resultatene viser at de helstøpte koppene har høyest holdfasthet, med et snitt på 79,56 kV/mm. Ved å introdusere et grensesjikt i midten av objektet svekkes holdfastheten i snitt med 15,7%. Dette kommer trolig av hulrom eller partikler som legger seg i grenseflaten. Det var ikke mulig å vurdere innvirkningen av de oksiderte partiklene, da resultatene fra disse objektene var tilnærmet like som for de med grensesjikt. Metallpartiklene har en tydelig destruktiv effekt på materialet, da objektene fra denne kategorien i snitt hadde 39,2% lavere holdfasthet enn de helstøpte.

Effekten av fukt er tydelig for objektene uten partikler, der holdfastheten falt med rundt 20%. For disse kategoriene er det også mindre spredning i resultatene enn for de tørre objektene. Koppobjektene med partikler viser ingen merkbar endring i holdfasthet ved fukting.

Abstract

Fiber optic submarine cables are used for their large capacity and fast signal transmission. At large distances the light signal in fiber optics deteriorate, and must be amplified at given intervals along the cables length. Nexans ROC-2 utilizes active amplifiers driven by 10 kV DC voltage. This imposes requirements regarding the cable insulations electrical endurance. Appropriate voltage tests are carried out to verify that the cable will not break down within its specified lifetime. Currently, there is not a sound basis for determining such tests for ROC-2.

In order to verify its lifetime, one must examine the cables weak points. Electrical breakdown in polymers usually have their origin in defects or impurities in the material. In previous work it has been found several cases of oxidized particles in ROC-2 cable lengths. Such particles can have higher permittivity and conductivity than the bulk insulation material, thereby causing high local field concentration in the insulation. Therefore, this work intends to investigate the impact of oxidized particles on the electrical withstand strength of the material.

0.25 mm thick plates of the insulation material were aged for 480 hours to achieve a high degree of oxidation. The material was then crushed into particles in the range of 100-200 μm . The particles were then placed in Rogowski cup objects and subjected to ramped AC voltage to breakdown. The same test was also carried out on reference objects; monolithic objects without particles (category A), objects with a boundary layer in the middle (category B) and objects with embedded metal particles (category D). Half of the cups were water saturated to investigate the correlation between moisture and electrical withstand strength.

The results show that the category A cups have the highest strength, with an average of 79.56 kV/mm. By introducing a boundary layer in the middle of the object the withstand strength is lowered on average by 15.7%. This is probably due to voids or particles present on the interface. It was not possible to evaluate the impact of the oxidized particles, since the results of these objects were nearly equal to those with a boundary layer. Metal particles, on the other hand, have a significant destructive effect on the material. The objects from this category had on average 39.2% lower breakdown strength than those of category A.

The effect of moisture is evident for objects without particles (A and B), with a drop in breakdown strength by about 20%. For these categories there are also less variation in the results than for the dry items. The objects with particles (C and D) show no significant change in breakdown strength after moistening.

Innhold

1	Introduksjon	1
1.1	Formål	1
1.2	Bakgrunn	1
1.3	Omfang	2
2	Teori	3
2.1	Oksidering av polyetylen	3
2.1.1	Polymerstruktur og polyetylen	3
2.1.2	Oksidasjon	5
2.1.3	Infrarød spektroskopi	6
2.2	Elektrisk nedbrytning av polymerisolasjon	9
2.2.1	Irregulariteter i kabelisolasjon	10
2.2.2	Feltforsterkning ved AC-påtrykk	11
2.2.3	Feltforsterkning ved DC-påtrykk	12
2.2.4	Nedbrytning	13
2.2.5	Sammenbrudd	14
3	Metode	15
3.1	Fremstilling av oksiderte partikler	15
3.1.1	Termisk aldring av HDPE-plater	15
3.1.2	FTIR-spektroskopi	15
3.1.3	Oppmaling av materiale	16
3.2	Ekstrudering	16
3.2.1	Tape	17
3.2.2	Film	17
3.3	Støping av prøveobjekter	17
3.3.1	Pressing av plater	17
3.3.2	Koppobjekter	18
3.4	Gjennomslagstester	21
3.4.1	Oppsett og elektroding	21
3.4.2	Prosedyre	21
3.4.3	Testprogram	22
3.5	Mikroskopanalyse	22
4	Resultater	23
4.1	FTIR-målinger	23
4.2	Gjennomslagstester	24
4.2.1	Tørre objekter	24
4.2.2	Oppfuktede objekter	27

4.3	Mikroskopanalyse	30
5	Diskusjon	33
5.1	Oksidering	33
5.2	Dielektrisk holdfasthet	33
5.2.1	Tørre objekter	33
5.2.2	Fuktete objekter	34
5.3	Resultatenes betydning for videre testutvikling	34
6	Konklusjon	36
7	Videre arbeid	37
A	Partikkelfunn i kabellengder	40
B	Gjennomslagsverdier	49
C	Beregning av elektrisk felt	50

Figurer

1	Tverrsnitt av ROC-2LW.	2
3	Morfologi i polyetylen[5]	4
4	Prinsipielle skisser av forgreininger og kryssbindinger[4].	4
5	Autokatalyserende dannelse av hydroksider	6
6	De seks mulige vibrasjonsmodusene for en metylgruppe	8
7	Absorpsjon av IR-stråling i en prøve	9
8	Konfigurasjon med flate elektroder. Materialet med lavest permittivitet (her er $\varepsilon_1 < \varepsilon_2$) utsettes for et høyere elektrisk felt.	12
9	Elektrisk trevekst[20]	13
10	Oksidering av HDPE: Materialet endrer tydelig farge etter kun få dager.	15
11	Prinsipiell skisse av ekstruder: (1) motor, (2) hode, (3) varme-element, (4) ytre skall, (5) skrue, (6) pelletsbeholder, (7) aksiallager, (8) gir.	16
12	Montert støpeform for koppobjekter	18
13	Oversikt over de fire forskjellige kategoriene med prøveobjekter.	20
14	Testoppsett for gjennomslagstester av koppobjekter: (1): Koppobjekt, (2) elektrode med isolert kobberleder, (3) forsøksbeholder, (4) corona-ringer, (5) 0,22:100 kV transformator, (6) 220 V spenningskilde/styrepult.	21
15	Absorpsjonsspekter av ualdret og aldret HDPE	23
16	Weibull-plot av gjennomslagsspenningene på tørre koppobjekter i kategori A. Snittverdien er på 79,56 kV/mm, og resultatene har moderat spredning.	24
17	Weibull-plot av gjennomslagsspenningene på tørre koppobjekter i kategori B. Snittverdien er på 67,08 kV/mm, og resultatene har stor spredning.	25
18	Weibull-plot av gjennomslagsspenningene på tørre koppobjekter i kategori C. Snittverdien er på 69,6 kV/mm, og resultatene har stor spredning.	25
19	Weibull-plot av gjennomslagsspenningene på tørre koppobjekter i kategori D. Snittverdien er på 48,36 kV/mm, og resultatene har forholdsvis liten spredning.	26
20	Weibull-plot av gjennomslagsspenningene på fuktete objekter i kategori A. Snittverdien er på 63,05 kV/mm. Liten spredning.	27
21	Weibull-plot av gjennomslagsspenningene på fuktete koppobjekter i kategori B. Snittverdien er på 55,12 kV/mm, og resultatene har liten spredning.	27

22	Weibull-plot av gjennomslagsspenningene på fuktete koppobjekter i kategori C. Snittverdien er på 70,2 kV/mm, og resultatene har stor spredning.	28
23	Weibull-plot av gjennomslagsspenningene på fuktete koppobjekter i kategori D. Snittverdien er på 53,33 kV/mm, og resultatene har forholdsvis liten spredning.	28
24	Grensesjikt i koppobjekt	30
25	Oksidert partikkel fra tørt objekt: Ingen synlig trevekst fra partikkelen, selv om den ligger med skarpe kanter i retning av feltet. Partikkelen er trolig en utskåret del av en større partikkel.	31
26	Metallpartikkel i en strimlet skive fra kategori D	31
27	Gjennomslagspunkt i koppobjekt	32
28	Oksidert partikkel lokalisert i ROC-2	33
29	ROC-2LW: Illustrasjon som demonstrerer de forskjellige lagene i kabelen.	40
30	Terminering og testoppsett	41
31	Spiralisert isolasjonsmateriale	42
32	Hulrom	45
33	Oksidert partikkel	45
34	Metallpartikkel	46
35	Urenhetenes plasseringer	47
36	Ved å justere dybdefokuset blir det klart at hulrommet ligger under overflaten	47
37	Trevekst på hulrom	48

Tabeller

1	Absorpsjonsfrekvenser til et utvalg funksjonelle grupper . . .	9
2	Data for ekstrudering av HDPE	16
3	Prosedyre for støping av HDPE-plater	18
4	Prosedyrer for støping av koppobjekter	19
5	Testprogram for AC gjennomslagstester: antall kopper av hver kategori	22
6	Gjennomslagsverdier for de tørre testobjektene	26
7	Gjennomslagsverdier for de fuktede testobjektene	29
8	Sammenligning av snittverdier for tørre og fuktede objekter .	29
9	AC gjennomslagsspenninger	44
10	Funn av urenheter	45

1 Introduksjon

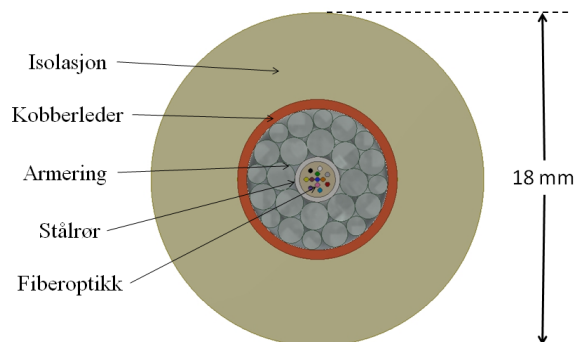
1.1 Formål

Hensikten med dette studiet er å utarbeide spenningstester for Nexans fiberoptisk sjøkabel med forsterkere; ROC-2LW (Repeated Optical Cable-2 Light Weight). Testene skal kunne verifisere at kabelen vil holde den angitte levetiden på 25 år.

1.2 Bakgrunn

Verden opplever stadig et behov for mer og raskere informasjonsutveksling. Interaksjon på tvers av landegrener krever signaloverføring over lange avstander. En stor andel av olje- og gassutvinningen flyttes til havbunnen, og stiller nye krav til kommunikasjon og fjernstyring. Fiberoptisk signaloverføring spiller en viktig rolle i å imøtekomme kapasitetsbehovet. Ett enkelt optisk fiber kan ha en kapasitet på over 10 Tbits/s, hvilket tilsvarer omtrent 150 millioner telefonsamtaler[1]. I dagens fiberoptiske løsninger buntet flere optiske fibre sammen og legges i sjø- eller landkabler. Kabelen består av lag som beskytter mot strekk, slag og vanninntrengning.

Dersom kabelen skal gå over store avstander vil det være nødvendig med forsterkning av lyssignalet ved gitte intervaller. Nexans' ROC-2 benytter aktiv forsterkning med strømdrevne forsterkere plassert for hver 50-70 km. Kabelen skal være i stand til å forsyne forsterkerne ved 10 kV påtrykt DC-spenning, og er derfor utstyrt med kobberleder og et elektrisk isolerende ytterlag. Ved et slikt spenningsnivå er det en risiko for at isolasjonsmaterialet brytes ned over tid dersom designet ikke er korrekt dimensjonert eller produksjonsprosessen introduserer defekter. Slike feil kan i verste fall lede til elektrisk gjennomslag i kabelen. Et ROC-2 system kan installeres på avstander opp mot 10 000 km, ned til 8000 meters dyp[2]. En reparasjon som følge av elektrisk gjennomslag vil dermed være tidkrevende, komplisert og kostbar.



Figur 1: Tverrsnitt av ROC-2LW.

Alle kommersialiserte høyspenningskabler må gjennomgå kvalifiserende spenningstester for å avdekke feil og sikre at kabelen ikke svikter innen sin levetid. Slike tester kategoriseres i hovedsak som *typetester* og *rutinetester*, og skal kvalitetssikre henholdsvis kabelens design og driftssikkerheten til hver produserte kabel. Testspenningens nivå og type varierer ut ifra kabelens design. ROC-2 må også gjennomgå slike tester for å verifisere at den overlever sin levetid på 25 år. Foreløpig finnes lite grunnlag for å fastslå hensiktsmessige tester for ROC-2.

1.3 Omfang

Dette studiet skal undersøke den elektriske holdfastheten til isolasjonsmaterialet til ROC-2. Spenningstester skal utføres på testobjekter der materialet er helt fritt for forurensinger, samt testobjekter med innlagte forurensinger. På denne måten skal forurensingenes effekt på materialet granskes.

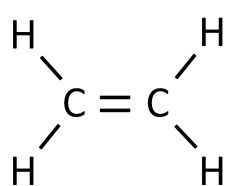
I testene vil det fokuseres på oksiderte partikler og deres effekt på materialet under spenningspåtrykk. Oksiderte partikler er av spesiell interesse fordi konduktive partikler er en av de største truslene mot kabler under likespenningspåtrykk.

2 Teori

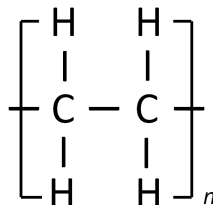
2.1 Oksidering av polyetylen

2.1.1 Polymerstruktur og polyetylen

Polymerer er lange molekylkjeder satt sammen av flere mindre molekyler; monomerer. Polymerkjedene dannes ved at monomerene lenkes sammen ved hjelp av sterke, kovalente, primærbindinger, og danner en gjentakende struktur. De lineære polymerkjedene bindes igjen sammen av svakere van Der Waals-bindinger. Monomeret i polyetylen er hydrokarbonet *eten* (C_2H_4). Etenmolekylet består av to dobbeltbundne karbon-atomer og to hydrogenatomer bundet til hvert karbonatom. Stoffet forekommer i gassform, men under bestemte forhold vil dobbeltbindingen i molekylene åpnes og binde seg til andre etenmolekyler. Slik dannes polymerkjeder. Lengden til en polymerkjede betegnes som grad av polymerisasjon n , der n er antall monomere lenket sammen i en polymerkjede. For polyetylen er n normalt i en størrelsesorden på $10^3 - 10^5$ [3].

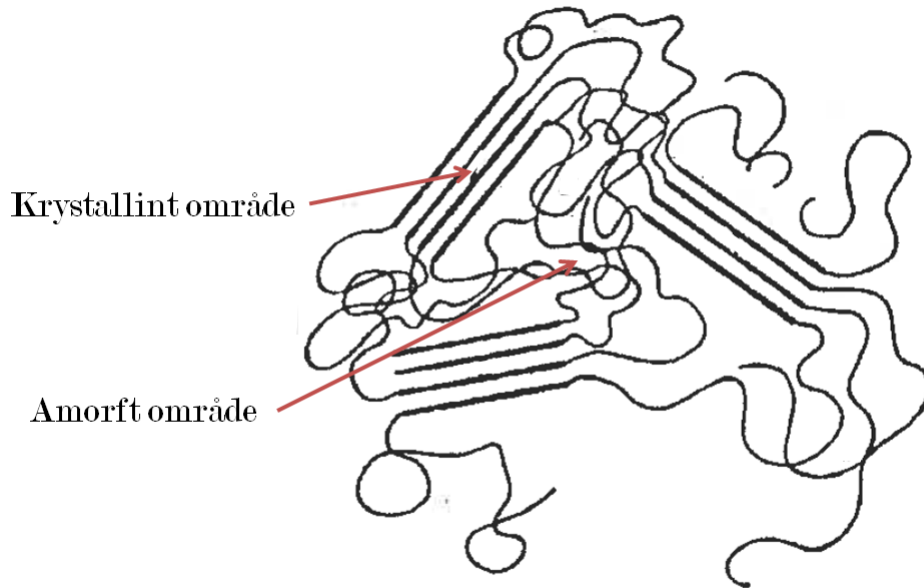


(a) Eten-molekyl



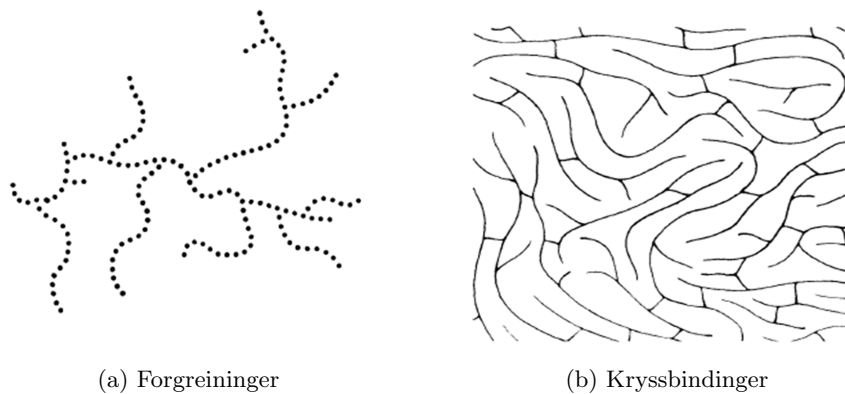
(b) Polyetylen

Polymerkjedestruktur deles inn i lineær, forgrenet og kryssbundet. Lineære polymerer består kun av polymerkjeder bundet sammen av sekundærbindinger. Forgrening forekommer når enden av en polymerkjede festes på den midtre delen av en annen kjede, ved hjelp av en primærbinding. En høy grad av forgreininger fører til en lavere tetthet i materialet som følge av at molekylene vil ligge i en uordnet, *amorf*, struktur. På den andre siden vil et materiale med høy linearitet ha høy tetthet på grunn av at molekylene ordnes i en regulær og kompakt struktur. Disse områdene av materialet betegnes som *krystallinske* områder. Et anvendelig polymermateriale må ha en avpasset kombinasjon av krystallinitet og amorf struktur, da et totalt krystallint materiale ville blitt for hardt og porøst, hvorpå et totalt amorf materiale ville blitt for mykt og viskøst. Polyetylen med lav eller mellomstor tetthet (LDPE og MDPE) har krystallinitet på rundt 40-60%, hvorpå HDPE har en lav andel forgreininger og dermed en krystallinitet på rundt 80% [4].



Figur 3: Morfologi i polyetylen[5]

Når to karbonatomer fra tilstøtende polymerkjeder bindes sammen med kovalent binding, oppstår kryssbindinger. Slike bindinger mellom molekylene danner et tredimensjonalt nettverk av kjedene og endrer materialet fra å være termoplastisk til å bli en herdeplast. Det innebærer at materialet ikke kan varmes opp og støpes om, slik som termoplastiske materialer.



Figur 4: Prinsipielle skisser av forgreininger og kryssbindinger[4].

2.1.2 Oksidasjon

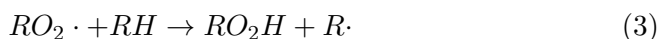
Når et stoff reagerer kjemisk med oksygen betegnes dette som oksidasjon. Selv om plastmaterialet på polymerisolerte kabler i liten grad er kjemisk reaktivt, vil også dette reagere med oksygen. Ved romtemperatur er forekomsten av reaksjoner mellom polymerer og oksygen liten[6]. Ved høyere temperaturer er forekomsten hyppigere. Oksidasjon fører til nedbrytning av materialet, og endrer materialets farge og mekaniske og elektriske egenskaper.

Mekanismen ved oksidering av polymerer består av flere ulike reaksjoner, og kan deles inn i forskjellige sekvenser; initiering, forplantning og terminering. De viktigste reaksjonene ved oksidering av polyetylen trekkes frem av Baum[7]:

Initiering:



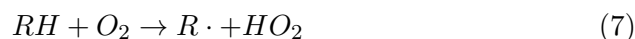
Forplantning:



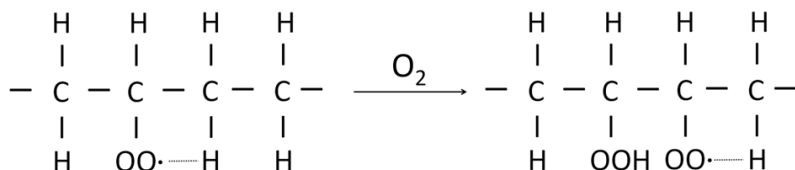
Terminering:



Initieringen (1) skjer ved dannelsen av frie radikaler $R\cdot$. Slike radikaler er molekyler eller atomer med uparede valenselektroner, noe som gjør dem svært reaktive. Radikalene kan oppstå som følge av en rekke årsaker. De kan komme av brudd på molekylkjedene, høy termisk energi, stråling eller mekanisk påkjenning[3]. Hydrokarbonene kan også reagere med oksygenmolekyler direkte (7), men dette er en energikrevende reaksjon som forekommer i mindre grad[6].



På grunn av oksygenmolekylets elektronegative natur vil det lett binde seg til alkylradikaler i polymeret (2). Ved oksidasjon vil storparten av oksygenet som tas opp i materialet, binde seg til alkylradikaler[6]. Oksideringen forplanter seg ved at peroksidet som ble dannet i (2) tar til seg et hydrogenatom fra et tilstøtende hydrokarbon (3), og dermed danner et nytt radikal i tillegg til et hydroperoksid, ROOH.



Figur 5: Autokatalyserende dannelse av hydroksider

Nedbrytningen av hydroperoksider utgjør det viktigste steget i autoksidasjon av polymerer, fordi det er hovedmekanismen for initiering i oksidasjonsprosessen [6]. Det er også utgangspunktet for dannelsen av en rekke oksidasjonsprodukter, som aldehyder, ketoner, syrer og alkoholer[8]. Oksidasjonsraten øker ved høyere temperaturer, men det er også andre faktorer som katalyserer prosessen. Oksidasjonen tiltar med høyere innhold av peroksider. Derfor vil polymeret ha en høyere oksidasjonsrate når prosessen er i gang, enn det har initielt. Grad av forgreining og forekomst av karbonyler vil også øke grad av oksidasjon, da dette kan svekke bindingene til nærliggende hydrogenatomer[7]. Ved aldring av polyetylen er det karbonyl(C=O)- og hydroksyl(OH·)-forbindelser som utgjør de dominerende produktene[10].

2.1.3 Infrarød spektroskopi

For å fastslå grad av oksidasjon i et materiale, må det undersøkes hvilke stoffer materialet inneholder. Oksidasjonsprodukter kan identifiseres ved å analysere de kjemiske sammensetningene i materialet. For å måle dette kan det benyttes infrarød spektroskopi. Metoden baserer seg på å sende elektromagnetisk stråling i IR-spekteret mot en prøve av materialet. Som følge av molekylær vibrasjon i materialet vil strålingen absorberes ved bestemte bølgelengder. Ved å måle absorpsjonen over et bestemt frekvensspekter kan en identifisere disse bølgelengdene og følgelig hvilke kjemiske sammensetninger som gir opphav til absorpsjonen. Teknikken tar utgangspunkt i energien i et molekyl, som består av flere komponenter[11]:

$$E_{total} = E_{elektronisk} + E_{vibrasjon} + E_{rotasjon} \quad (8)$$

Den elektroniske energien, $E_{elektronisk}$, relateres til hvordan elektronene distribueres og beveger seg internt i et molekyl. Rotasjonsenergien, $E_{rotasjon}$, kommer av molekylets dreierende bevegelse rundt aksene av karbonkjeder. Disse komponentene har lavere energinivåer, og absorpsjonsfrekvenser i andre områder av det elektromagnetiske spekteret, enn vibrasjonsenergien [11, 12]. Vibrasjon betegnes som atomenes bevegelse omkring sitt likevektspunkt i en kjemisk binding. For diatomiske molekyler, som O_2 , N_2 og F_2 , finnes én mulig vibrasjonsmodus: *strekking* og *komprimering*. Den fysiske modellen av disse bevegelsene kan betraktes som at atomene holdes sammen av en fjæring. Når atomene beveger seg fra og mot hverandre vil de opparbeide en potensiell energi som er proporsjonal med forflytningen. Denne mekanismen er beskrevet av Hookes lov:

$$F = -kx \quad (9)$$

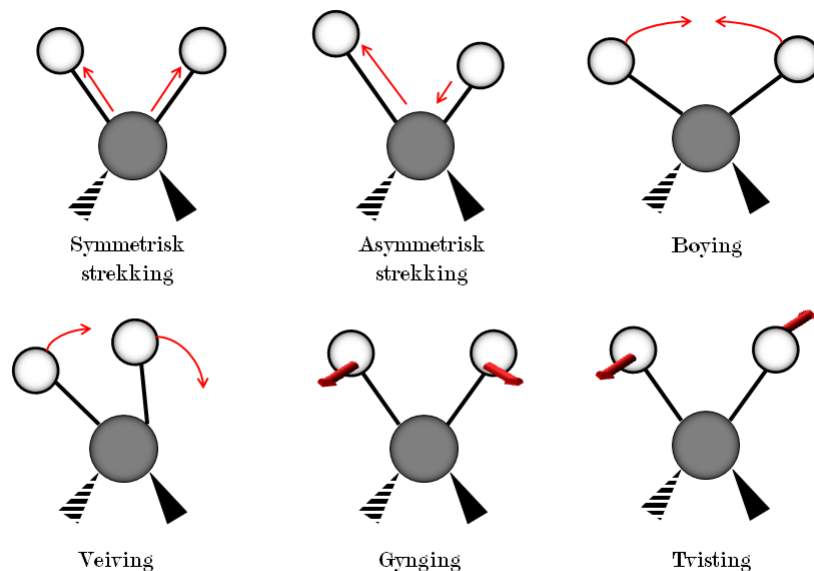
der kraften F tilsvare kraftkonstanten k multiplisert med endringen i avstand mellom atomene, x . k er stor for sterke bånd, som trippelbindingen i et N_2 -molekyl, og lav for svakere bånd. Den totale vibrasjonsenergien i bindingen er gitt ved

$$E_v = h\nu(v + \frac{1}{2}) \quad (10)$$

der h er Plancks konstant, ν er vibrasjonsfrekvensen og v er kvantetallet som karakteriserer vibrasjon. Vibrasjonsfrekvensen er også en funksjon av kraftkonstanten k :

$$\nu = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{\mu}} \quad (11)$$

der μ er reduksjon i masse. Ligning (11) etablerer sammenhengen mellom den kovalente bindingsstyrken, masse og vibrasjonsfrekvens [12]. For polyatomiske molekyler finnes langt flere mulige bevegelseskonfigurasjoner. Derfor vil det også være et større antall vibrasjonsmoduser. For en enkelt metylgruppe vil det finnes seks mulige vibrasjonsmoduser, som vist på figur 6.



Figur 6: De seks mulige vibrasjonsmodusene for en metylgruppe

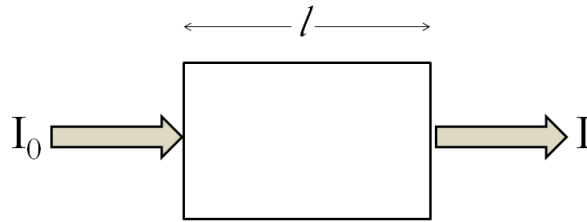
Kombinasjoner av de ovennevnte vibrasjonene langs en polymerkjede kan gi opphav til et høyt antall vibrasjonsmoduser. For lineære molekyler er antallet $3N - 5$, og $3N - 6$ for ulineære molekyler, der N er antall atomer i molekylet. I et absorpsjonsspekter er det likevel de seks normalmodusene som gir sterkest utslag. Disse vibrasjonene vil ha gitte frekvenser, da frekvensen bestemmes av bindingen mellom atomene (11). Absorpsjonen inntreffer når IR-strålingen korresponderer med vibrasjonsfrekvensen, og forårsaker et større dipolmoment ved å tilføre molekylet energi[12]. Frekvensen oppgis som regel i antall bølgeperioder per centimeter [cm^{-1}].

Absorpsjonen A måles i hvor mye av energien i strålingen som penetrerer materialet for en bestemt frekvens ν .

$$A = \log_{10}(I_0/I) \quad (12)$$

Beer-Lamberts lov beskriver absorpsjon som en funksjon av prøvens tykkelse l , konsentrasjon c og *molar absorbtivitet* $\varepsilon(\tilde{\nu})$ ved et gitt bølgenummer $\tilde{\nu}$.

$$A = \varepsilon(\tilde{\nu})cl \quad (13)$$



Figur 7: Absorpsjon av IR-stråling i en prøve

Tabell 1 gir en oversikt over noen av de viktigste absorpsjonsfrekvensene for visse metylen- og karbonylgrupper[12].

	Funksjonell gruppe	Frekvens [cm^{-1}]
Metylengrupper	C-H asymmetrisk strekking	2935-2915
	C-H symmetrisk strekking	2865-2845
	C-H bøying	1485-1445
	$-(\text{CH}_2)_n$ - gynging	750-720
Karbonylgrupper	Karboksylat	1610-1550/1420-1300
	Amid	1680-1630
	Karboksytsyre	1725-1700
	Keton	1725-1705
	Aldehyd	1740-1725
	Ester	1750-1725

Tabell 1: Absorpsjonsfrekvenser til et utvalg funksjonelle grupper

2.2 Elektrisk nedbrytning av polymerisolasjon

Polymerisolerte kabler benyttes i økende grad fremfor kabler med andre isolasjonssystemer, som masseimpregnerte, olje- eller gassfylte kabler. Dette skyldes blant annet at polymerisolerte kabler tåler høyere temperatur, har lettere konstruksjon og lavere vedlikeholdskostnader[13]. Likevel er det uunngåelig at polymerisolasjon vil aldres over tid, som følge av kjemiske reaksjoner, mekaniske eller elektriske påkjenninger. Isolasjonsmaterialet er desto mer utsatt for nedbrytning ved forekomst av interne urenheter. Aldringen kan forringe isolasjonens elektriske egenskaper og i verste fall føre til gjennomslag og havari av kabelen.

2.2.1 Irregulariteter i kabelisolasjon

Produksjonsprosessen til polymerisolerte kabler er vanskelig å holde helt fri for støv og partikler. Irregulariteter i isolasjonen vil alltid forekomme i noen grad. De forskjellige typene defekter som kan inntre kategoriseres ofte etter sine elektriske egenskaper. I de følgende avsnittene gis en kort oversikt noen av de vanligste urenheterne som forekommer i kabelisolasjon.

Forurensinger med lav dielektrisk holdfasthet

Hulrom: Støvpartikler kan inneholde gass eller fukt. Dersom støvpartikler trer inn i isolasjonsmaterialet under produksjon, kan det oppstå hulrom på grenseflaten mellom støvpartikkelen og isolasjonen. Hulrom kan også oppstå ved ujevne sammentrekninger i materialet eller som følge av kjemiske reaksjoner i materialet. Lokal feltforsterkning oppstår når gassen i hulrommet har en annen relativ permittivitet ϵ_r enn isolasjonen [5].

Oksidert materiale: Støvpartikler eller rester av plastisolasjon som er brent eller sterkt oksidert. Slike urenheter kan skimtes som brune eller svarte partikler. De oksiderte områdene får høyere permittivitet ϵ_r og høyere konduktivitet σ i takt med grad av oksidasjon[14].

Metalliske og konduktive partikler

Metallpartikler: Små fragmenter av metall fra produksjonsprosessen.

Skarpe, ledende penetreringer: Skarpe gjenstander som punkterer isolasjonen fra utsiden. Kan forekomme i behandlingen av ferdig produsert kabel.

(Oksidert materiale tilhører også denne kategorien.)

Vesentlige karakteristikk

Ved siden av defektenes elektriske egenskaper er det også andre faktorer som har betydning for kabelens holdfasthet:

- Holdfastheten har vist seg å være avtagende for økende **størrelse** på urenheterne, ved AC- og impulsspenninger[15].
- Høy **konsentrasjon** av partikler gir flere potensielle opprinnelsespunkter for trevekst. For metallpartikler senkes holdfastheten med økende konsentrasjon, ved AC- og impulsspenninger[15, 16].
- **Formen** på urenheten er av betydning, da skarpe punkter kan føre til høyere feltkonsentrasjon omkring det skarpe punktet.

- I en kabelkonfigurasjon vil partikkelens **plassering** i forhold til lederen avgjøre hvilket nivå av elektrisk felt urenheten blir utsatt for. Partikler nær lederen blir utsatt for et høyere elektrisk felt, som vist i vedlegg C.
- Urenhetens **orientering** er av betydning da skarpe partikler som ligger parallelt med det elektriske feltet får høy feltkonsentrasjon rundt endene[17].

2.2.2 Feltforsterkning ved AC-påtrykk

For AC-spenning bestemmes den elektriske felttettheten D av påtrykt spenning og permittiviteten ε til materialet, det vil si materialets evne til å lede feltet E .

$$D = \varepsilon E, \varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r, \quad (14)$$

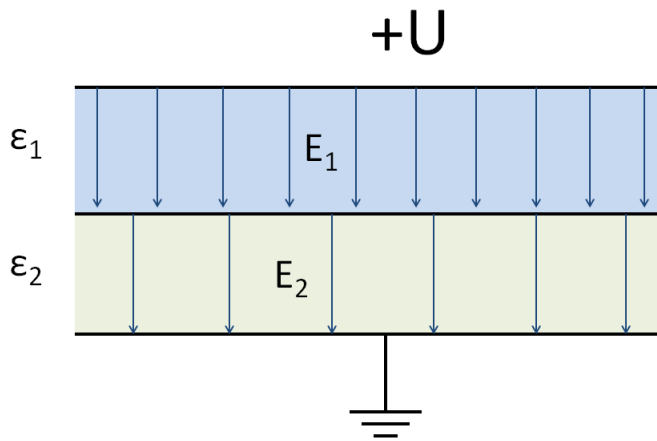
der ε_0 er permittiviteten i vakuum og ε_r materialets relative permittivitet.

Dersom to materialer som ligger i kontakt med hverandre har forskjellig permittivitet vil det elektriske feltet fordele seg ujevnt over de to materialene. I en konfigurasjon med plane, parallelle elektroder må felttettheten være den samme på grenseflaten mellom de to materialene, såfremt de er frie for romladninger. Derfor vil materialet med lavest permittivitet utsettes for et høyere elektrisk felt.

$$D_1 = D_2 \quad (15)$$

$$\varepsilon_1 E_1 = \varepsilon_2 E_2 \quad (16)$$

$$E_1 = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} E_2 \quad (17)$$



Figur 8: Konfigurasjon med flate elektroder. Materialet med lavest permittivitet (her er $\epsilon_1 < \epsilon_2$) utsettes for et høyere elektrisk felt.

På samme måte kan en forurensing med avvikende permittivitet oppleve et høyere elektrisk felt enn isolasjonen som omslutter den. Dermed kan urenheten bli et opprinnelsepunkt for elektrisk trevekst, som følge av høy lokal feltforsterkning.

2.2.3 Feltforsterkning ved DC-påtrykk

Den elektriske felddistribusjonen ved DC-påkjenning er sterkt temperaturavhengig. Dette kommer av at konduktivitet σ øker med temperatur. Da resistiviteten ρ gis ved $\rho = \frac{1}{\sigma}$ indikerer dette at feltet bestemmes av lokal elektrisk motstand[13].

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (18)$$

der \mathbf{J} er strømtetthet og \mathbf{E} er elektrisk felt. Initielt etter spenning påtrykkes vil feltet fordele seg rent kapasitivt, slik som for AC. Feltet vil så gradvis endres med tid ettersom det opparbeides en temperaturgradient i materialet. I et temperaturintervall på 20°-60°C kan resistiviteten endre seg med en faktor på 2-3 ganger[18]. Da DC-feltet avhenger av elektrisk felt og konduktivitet, som igjen er avhengig av tid, må det benyttes numeriske metoder for å beregne dette nøyaktig[19].

Potensielt skadelige feltforsterkninger ved DC-påtrykk skyldes i hovedsak akkumulering av romladninger i materialet[3]. Ved variasjon i konduktiviteten i retning med det elektriske feltet vil romladninger oppstå[13]. Derfor vil det bygges opp romladninger rundt konduktive partikler. Ladningene som injiseres er *homopolare*, det vil si at de har samme polaritet som den nærliggende elektroden. Potensialet mellom romladningene og elektroden blir dermed mindre, slik at partikkelen skjermes for det elektriske feltet. Spenningen må derfor være spesielt høy for å oppnå gjennomslag i isolasjonen ved DC-påtrykk. Faremomentet ved akkumulering av romladninger er plutselige jordinger eller polaritetsreverseringer. Da romladningene “låses” i materialet kan de ikke endres umiddelbart. Feltkonsentrasjonen kan derfor bli betraktelig høyere rundt en eventuell urenheter dersom polariteten på elektrodene reverseres.

2.2.4 Nedbrytning

Feltforsterkninger kan bryte ned isolasjonsmaterialet ved at feltkonsentrasjonen blir høyere enn materialets holdfasthet. Nedbrytning kan også forårsakes av interne utladninger, som gradvis eroderer materialet. Dette forekommer i gassfylte hulrom der det elektriske feltet raskt kan overskride gassens gjennomslagsstyrke og initiere partielle utladninger. Det skjer ved at ladning samles på flater i hulrommet, på samme måte som en kondensator. Etter hvert som ladningene akkumuleres, bygges det opp en spenning som er tilstrekkelig stor til å utløse et elektrisk kred, som igjen initierer en utladning. Når utladningen inntreffer sendes de ladningsbærende ionene og elektronene med høy hastighet mot den motstående veggen. Veggene eroderes gradvis ved at polymerkjedene brytes når de treffes av ioner og elektroner med høy energi. Varme og stråling fra partielle utladninger kan også oksidere innsiden av hulrommet slik at veggene blir ledende[5].



Figur 9: Elektrisk trevekst[20]

Defekter kan initiere elektrisk trevekst ved å først forårsake små sprekker og groper i materialet. Inne i slike sprekker kan det forekomme partielle

utladninger som videre eroderer og forstørrer sprekke[21]. Nye sprekker kan springe ut fra de eksisterende sprekke og danne tunneler som vokser i et tre- eller busklignende mønster. Dersom en eller flere av tunnelene vokser seg gjennom hele isolasjonen kan dette lede til en punktering av isolasjonen.

2.2.5 Sammenbrudd

De tre viktigste mekanismene ved gjennomslag i fast stoff er *elektrisk sammenbrudd*, *termisk sammenbrudd* og gradvis elektrisk nedbrytning, som beskrevet i 2.2.3[5].

Elektrisk sammenbrudd skjer når spenningsnivået akselererer en mengde frie ladninger i materialet, tilstrekkelig til å danne et gjennomslag. De frie ladningene kan være iboende i materialet eller dannes ved at ioner løsrives fra molekylkjedene, som følge av at de får høy kinetisk energi av spenningspåtrykket[3]. Slike sammenbrudd krever en spenning som er langt høyere enn normal driftsspenning for kraftkabler. Derfor forekommer det som regel bare i forbindelse med laboratorieforsøk eller kraftige overspenninger[5].

Termisk sammenbrudd oppstår ved ubalanse i varmeavgivningen fra isolasjonen til omgivelsene. Da konduktivitet σ er sterkt avhengig av temperatur, vil også lekkstrømmen gjennom isolasjonen øke med temperaturen. Effekten av lekkstrømmen og motstanden i isolasjonsmaterialet genererer varme i materialet: $P = I^2R$. Lekkstrømmen kan også være ujevnt fordelt i isolasjonen slik at det kan dannes lokaliserte “baner” gjennom materialet, med økt vandring av ladninger: $P = \mathbf{J}\mathbf{E}$. Effekten av den ohmske oppvarmingen er dermed selvforsterkende. Ved høyere temperatur er det flere frie ladninger tilgjengelig i materialet. Dersom mengden frie ladninger blir for stor vil det gå et gjennomslag fra lederen til jord. Et gjennomslag vil generere nok varme til påføre isolasjonen en fatal skade. Av denne grunn kan derfor alle elektriske sammenbrudd i fast stoff betegnes som termiske[5].

3 Metode

3.1 Fremstilling av oksiderte partikler

I forsøkene er det gjort tester på oksiderte partikler lik de som er lokalisert i ROC-2 (se vedlegg A). Ved å selv konstruere slike partikler kan det produseres et stort kvantum med prøveobjekter, i tillegg til at det kan føres god kontroll over hvordan materialets fysiske egenskaper endrer seg i prosessen.

3.1.1 Termisk aldring av HDPE-plater

Til oksidering av materialet ble det benyttet 0,25 mm HDPE-plater. Disse ble plassert i spesiallagde former med samme radius som plastplatene. Formene var av teflon for å hindre at polyetylenen satte seg fast i formen ved smelting. Formene ble så plassert i et varmeskap på 170°C, i 480 timer.



Figur 10: Oksidering av HDPE: Materialet endrer tydelig farge etter kun få dager.

3.1.2 FTIR-spektroskopi

Ved klargjøring av FTIR-mikroskopet ble aperturen stilt inn på 200 x 200 μm , og intensiteten på strålen justert til ~ 6250 . Mikroskopet ble så programmet til å gjøre 128 målinger i spekteret mellom 4000-580 [cm^{-1}].

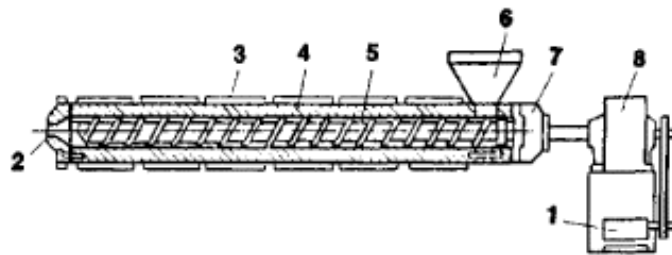
Først ble det gjort målinger av *bakgrunnen*, det vil si luften mellom objektivet og detektoren, glasset i objektivet og alt det IR-strålen treffer, annet enn materialprøven. Dette gjøres fordi de molekylære bevegelsene i disse stoffene også gjør et utslag i absorpsjonsspekteret. Ved å først karakterisere absorpsjonen i bakgrunnen, kan apparatet kompensere for disse verdiene ved målinger på fast materiale. Så ble en prøve med 0.2 mm tykk HDPE montert på preparatskiven og målt. På denne måten ble det først etablert et absorpsjonsspekter av ualdret materiale, som referanse ved måling av det oksiderte materialet. Videre ble det foretatt en måling av aldrert materiale. Målingen ble gjort på en 25 μm tynn prøve av den oksiderte platen.

3.1.3 Oppmaling av materiale

Det oksiderte materialet ble plassert i en 6,5 cm høy sylindrisk metallbeholder, sammen med tre metallkuler i forskjellige størrelser. Beholderen ble nedkjølt med flytende nitrogen for å unngå overoppheting som følge av friksjon mellom kulene og beholderveggene. Beholderen ble så montert i et vibrasjonsapparat og ristet mekanisk på 20 Hz i 45 sekunder. Det oppmalte innholdet ble silt og dermed inndelt i størrelsesintervaller på 250-355 μm , 100-250 μm og $<100 \mu\text{m}$.

3.2 Ekstrudering

Isolasjonsmaterialet leveres i form av pellets. Pellets er ikke fordelaktig å benytte direkte til støping av objekter, da det er mye overflate som må smelte sammen. Dermed blir det større risiko for partikler og interne grensesjikt i støpeobjektene. For å sikre at materialet blir mest mulig homogent ekstruderes derfor pellets, før materialet benyttes til videre støping. Ekstruderen smelter og blander pelletsene, slik at materialet som forlater ekstruderen blir gunstigere å benytte til støping av objekter.



Figur 11: Prinsipiell skisse av ekstruder: (1) motor, (2) hode, (3) varmelement, (4) ytre skall, (5) skrue, (6) pelletsbeholder, (7) aksiallager, (8) gir.

Ekstruderen benyttet er en Collin E20P. Løpet er inndelt i fem forskjellige varmesoner for å sikre optimal flyt av plasten. Temperaturinndelingen er gitt i tabell 2.

Sone	1	2	3	4	5
T[°C]	160	180	200	190	190

Rotasjonshastighet [rpm]: tape: 70 / film: 50

Tabell 2: Data for ekstrudering av HDPE

3.2.1 Tape

Først ble det ekstrudert materiale til støping av koppobjekter. Til dét ble det benyttet et ekstruderhode med 12 mm x 50 mm åpning. Etter hvert som materialtapen forlot ekstruderen ble den klippet i ~0,5 meter lange segmenter.

Av tapen ble det så presset ut tabletter med en rund kniv med 5,5 cm diameter. For at tapen skulle bli mykere og lettere å skjære i ble den først plassert i et varmeskap på 90 grader. Tablettene ble oppbevart i en rengjort og lukket beholder.

3.2.2 Film

Ved støping av tynne HDPE-plater er det hensiktsmessig å bruke tynnere strimler av materialet. Derfor ble det ekstrudert film, gjennom et ekstruderhode med 0,5 mm x 100 mm åpning. Filmen ble rullet over to metallvalser, og dermed kjølt ned før den til slutt ble kveilet om en sylindrisk trommel. Filmrullene ble oppbevart i sterile, lufttette plastposer.

3.3 Støping av prøveobjekter

Ved støping av prøveobjekter er det essensielt at materialet behandles i rene omgivelser, for å unngå inntreden av partikler i objektene. All behandling og preparering av objektene ble derfor gjort på et rengjort bord, i filtrert luft.

3.3.1 Pressing av plater

Det ble støpt HDPE-plater til to forskjellige formål: oksidering av materiale og bunnstøping av koppobjekter.

Platene ble støpt i jernformer bestående av tre deler; en ytre ring, en plate i midten av ringen og en tynn metallplate til justering av støpetykkelse. HDPE-film ble klippet i 2 cm brede strimler og lagt i stjerneformasjon i midten av formen. For å oppnå en glatt overflate på platen ble det lagt en PET-film mellom formen og pressflaten. Fem plater ble støpt samtidig.

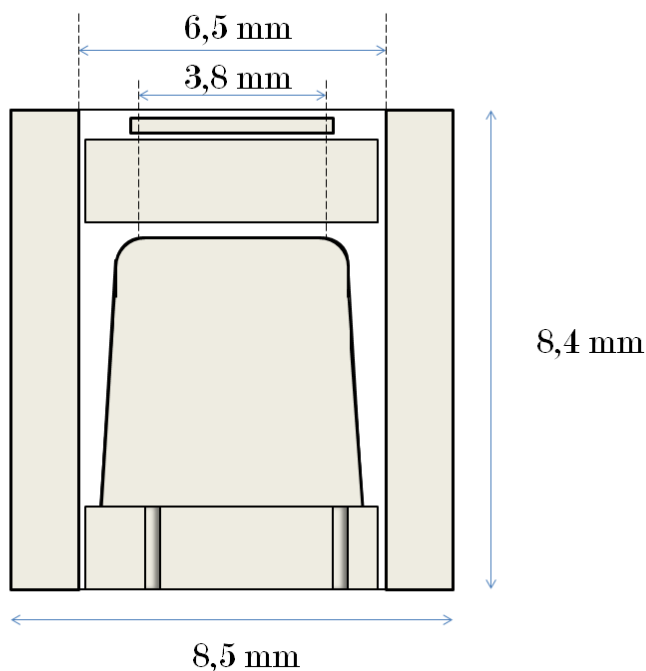
Den mekaniske pressa ble programmert til å gå gjennom en lavtrykksyklus og en høytrykksyklus. I lavtrykksyklusen varmes formene og materialet opp under moderat press, til materialet smelter. Pressa øker trykket i høytrykksyklusen, og presser ut overflødig materiale for å sikre at platene får ønsket tykkelse. Etter høytrykksyklusen ble pressa og formene avkjølt til romtemperatur.

Tykkelse	T [°C]	Mengde materiale [g]	Lavtrykk	Høytrykk
0,25 mm	130	4,5	2,5 tonn/12 min	25 tonn/2 min
0,5 mm	130	9	2,5 tonn/15 min	25 tonn/3 min

Tabell 3: Prosedyre for støping av HDPE-plater

3.3.2 Koppobjekter

Støpeformene til koppobjektene besto av én midtre del som preget ut selve koppen, én bunnkloss som ble presset mot bunnen av koppen og én sylinder som holdt klossene på plass. I tillegg ble det lagt metallshims til justering av bunntykkelse, oppå bunnklossen. Se figur 12 for konfigurasjon. Tablettene (som beskrevet i 3.2.2) ble plassert mellom den midtre klossen og bunnklossen. For å oppnå korrekt dosering av materialet ble det kompensert med pellets. Disse ble nøye plassert nede formen, slik at de ikke bidro til å danne interne grensesjikt i nærheten av koppobjektets bunn. Ni slike former ble plassert sammen i pressa. Rundt de ytterste formene ble det plassert en kvadratisk metallramme for å holde på varmen i formene.



Figur 12: Montert støpeform for koppobjekter

I likhet med platene ble også koppene støpt gjennom en lavtrykksyklus og en høytrykksyklus. Når polyetylen smelter endrer molekylene struktur, slik at materialet utvider seg. Formene ble derfor også avkjølt under høyt trykk, slik at koppene bevarte formen sin ved avkjøling til romtemperatur. Prosedyren er oppsummert i tabell 4.

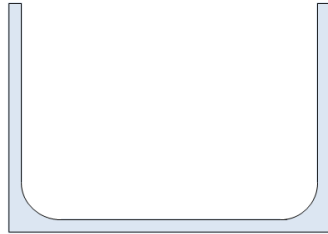
Bunntykkelse	Shims tykkelse	T [°C]	Mengde materiale	Lavtrykk	Høytrykk
1 mm	2.2 mm	140	33 g	2,5 tonn/ 50 min	25 tonn/4 min, avkjøling
0,5 mm	2.7 mm	140	31 g	2,5 tonn/ 50 min	25 tonn/4 min, avkjøling
0,5+0,5 mm	2.2 mm	140	-	2,5 tonn/ 55 min	25 tonn/4 min, avkjøling

Tabell 4: Prosedyrer for støping av koppobjekter

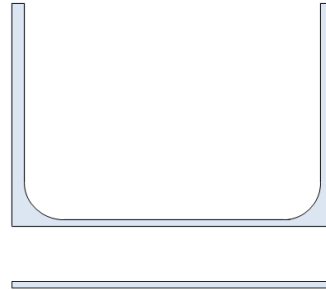
Koppene med 0,5 mm bunntykkelse ble ytterligere bearbeidet og støpt om til tre forskjellige testobjekter. Først ble 0,5 mm tykke HDPE-plater skåret ut i sirkler med lik radius som koppobjektene, slik at hver plate kunne støpes inn på bunnen av et koppobjekt. Kontaktflaten mellom koppen og platen ble rensert med isopropanol og trykkluft for å unngå uønskede partikler i grensesjiktet.

Det første partiet besto kun av kopper støpt sammen med plater. I de to neste partiene ble det lagt inn partikler mellom koppen og platen, før støping. Det ene partiet besto av kopper med oksiderte partikler. Partiklene fra 3.1.3, i størrelsesorden 100-250 μm , ble først strødd utover et ruteark med 1 mm rutestørrelse. Ved hjelp av et mikroskop ble partikler mellom 100 og 200 μm plukket ut og plassert på koppen. På hver kopp ble det plassert 10 slike partikler, jevnt fordelt utover det området av bunnflaten med uniform tykkelse. I det siste partiet med kopper ble det plassert partikler av stål. Partiklene var 100-200 μm store og irregulære i formen, slik som de oksiderte partiklene. 10 slike partikler ble plassert i hver kopp i dette partiet.

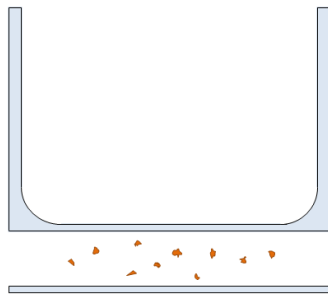
I alt ble det støpt fire forskjellige typer testobjekter. Disse vil videre refereres til som kategori A, B, C og D.



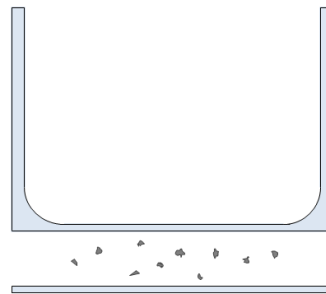
(a) **Koppobjekt A:**
- 1 mm tykk bunn
- helstøpt



(b) **Koppobjekt B:**
- 0,5+0,5 mm tykk bunn
- grensesjikt



(c) **Koppobjekt C:**
- 0,5+0,5 mm tykk bunn
- 10 stk oksiderte partikler i grensesjiktet



(d) **Koppobjekt D:**
- 0,5+0,5 mm tykk bunn
- 10 stk metallpartikler i grensesjiktet

Figur 13: Oversikt over de fire forskjellige kategoriene med prøveobjekter.

Hver kopp ble påmalt halvledende sølvepoxy på hver side av koppens bunn. Dette sikret god elektrisk kontakt mellom elektroden og plastmaterialet.

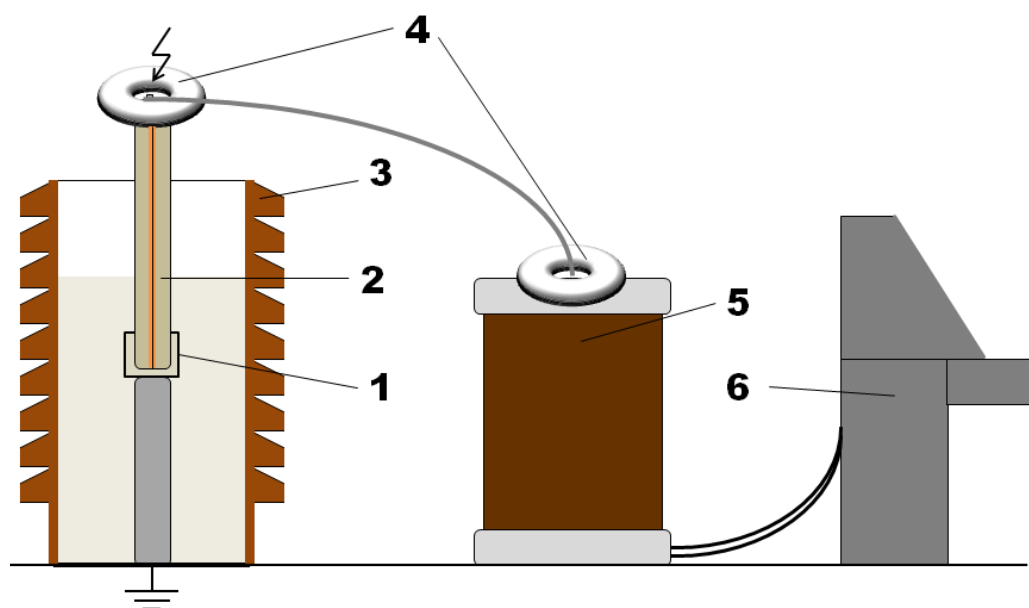
Av de 39 ferdig støpte koppene ble 19 av disse plassert i en beholder med demineralisert vann. Vannbeholderen ble så plassert i et varmeskap på 90°C i 72 timer, slik at koppene ble mettet med vann.

3.4 Gjennomslagstester

3.4.1 Oppsett og elektroding

Spenningen ble generert av en manuelt regulerbar kilde på 3-220 V, 50 Hz AC. Denne var koblet til en 0,22:100 kV transformator. Sekundærsiden av transformatoren var koblet til elektroden som ble plassert i kontakt med koppobjektene. Rundt koblingspunktene på lederen mellom transformatoren og elektroden ble det plassert corona-ringer, for å dempe forekomst partielle utladninger i lufta rundt skarpe kanter.

Forsøksbeholderen var sylindrisk og fylt med silikonolje. Opp fra midten av beholderens bunn sto en metallektrode. Hver kopp ble plassert slik at bunnen på koppen ble trykket mellom denne og elektroden som ble montert ovenfra. Elektroden og koppen ble montert konsentrisk i beholderen.



Figur 14: Testoppsett for gjennomslagstester av koppobjekter: (1): Koppobjekt, (2) elektrode med isolert kobberleder, (3) forsøksbeholder, (4) corona-ringer, (5) 0,22:100 kV transformator, (6) 220 V spenningskilde/styrepuvt.

3.4.2 Prosedyre

Spenningskapasiteten på 100 kV ble delt inn i 38 intervaller på 2,6 kV. Spenningspåtrykket startet dermed på 2,6 kV og ble økt med ett intervall

hvert 20. sekund. Tidsintervallet på 20 sekunder benyttes fordi det er betydelig lenger enn tiden det tar å justere spenningen fra et nivå til et annet, og fordi testtiden per objekt blir rundt 10 minutter[3]. Ved gjennomslag ble spenningen automatisk skrudd av. Holdfasthetsspenningen ble så notert ned. Denne defineres som det siste spenningsnivået før det som forårsaket gjennomslaget. Alt ledende utstyr ble jordet før testobjektet ble hentet ut.

3.4.3 Testprogram

Gjennomslagstestene hadde som hensikt å avdekke materialets holdfasthet med og uten innstøpte, oksiderte partikler. Da objektene med oksiderte partikler (kategori C) ikke kunne støpes i ett stykke, var det nødvendig å også inkludere referanseobjekt B i testprogrammet. På denne måten kunne det undersøkes om grensesjiktet i koppen hadde innvirkning på koppens holdfasthet. Testobjekt D ble også inkludert for å sammenligne effekten av de svært konduktive metallpartiklene med de oksiderte partiklene.

Da isolasjonsmaterialets praktiske anvendelse er undersjøisk, var et viktig aspekt ved testene forskjellen på tørre og fuktete testobjekter.

Koppobjekt	A	B	C	D
Tørr	5	5	5	5
Fuktet	4	5	5	5
Totalt	9	10	10	10

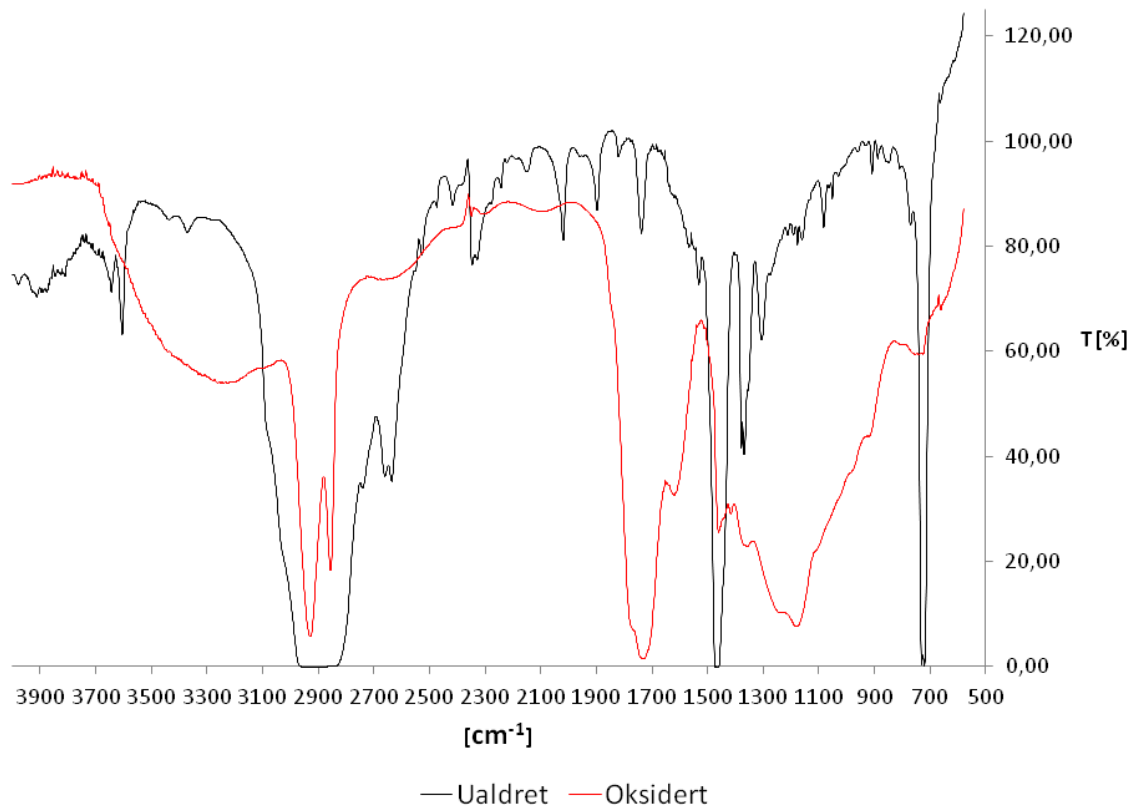
Tabell 5: Testprogram for AC gjennomslagstester: antall kopper av hver kategori

3.5 Mikroskopanalyse

Etter gjennomslagstestene ble enkelte av testobjektene med partikler analysert i et mikroskop. Minimum to partikler fra både tørre og fuktete objekter i kategori C og D, ble nærmere studert. Tverrsnittet av koppobjektene ble skåret i 100 μm tykke strimler der partiklene befant seg, ved hjelp av en mikrotom. Partiklene ble så studert i et mikroskop med 100-1000x forstørrelse. Analysen tok sikte på å gi ytterligere informasjon om hvorvidt støpingen av objektene ble som antatt, partiklenes plassering i objektene og eventuell trevekst fra partikler.

4 Resultater

4.1 FTIR-målinger



Figur 15: Absorpsjonsspekter av ualdret og aldret HDPE

Figur 15 viser absorpsjonsspekter av ualdret og aldret HDPE. Det ualdrede materialet kan tydelig karakteriseres på tre absorpsjonstopper. Den mest markante toppen ligger i frekvensområdet 2935-2915 cm^{-1} , og kommer av symmetrisk og asymmetrisk strekking i C-H bindingene langs polymerkjedene. Den neste markante toppen ligger i området 1485-1445 cm^{-1} og kommer av bøyninger i CH₂-monomerene. Karakteristisk for materialer med høy grad av krystallinitet[12] er absorpsjonen rundt 750-720 cm^{-1} , som kommer av den gyngende vibrasjonsmodusen til CH₂-kjedene. Den sistnevnte absorpsjonstoppen er betydelig svekket i den oksiderte prøven. Dette er i tråd med at grad av krystallinitet minker ved brytning av kjedene, dannelse av oksidasjonsprodukter og kryssbindinger. Den viktigste indikatoren på oksidasjon

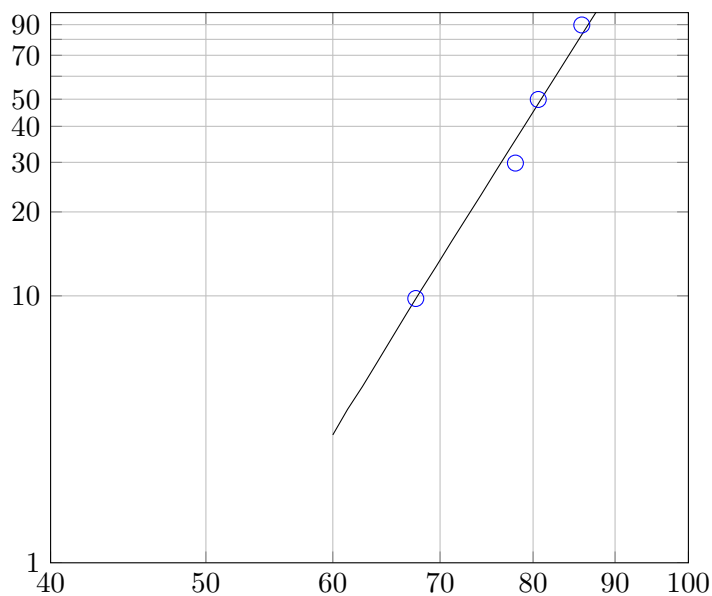
kommer av karbonylforbindelser, med utslag i området rundt 1700 cm^{-1} . Den oksiderte prøven introduserer også en topp ved $1320\text{-}1210\text{ cm}^{-1}$, som knyttes til C-O og O-H-grupper.

Det ble forsøkt å gjøre FTIR-målinger av de oksiderte partiklene lokalisert i kabellengder. Målingene mislyktes, da partiklene var mindre enn den minimale mulige åpningen på aperturet. Dermed ble partiklene for små til å gjøre et utslag i spekteret.

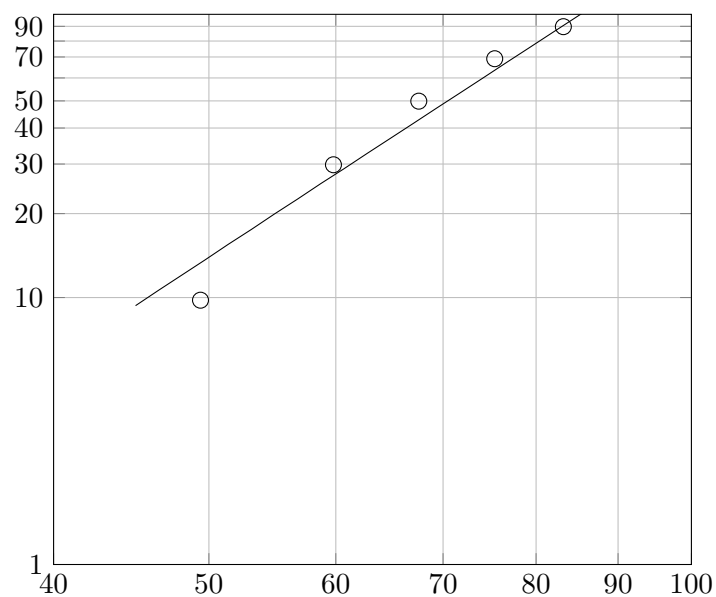
4.2 Gjennomslagstester

Her gis en grafisk oversikt over resultatene fra forsøkene. Detaljer fra hvert forsøk finnes i tabellform i vedlegg B.

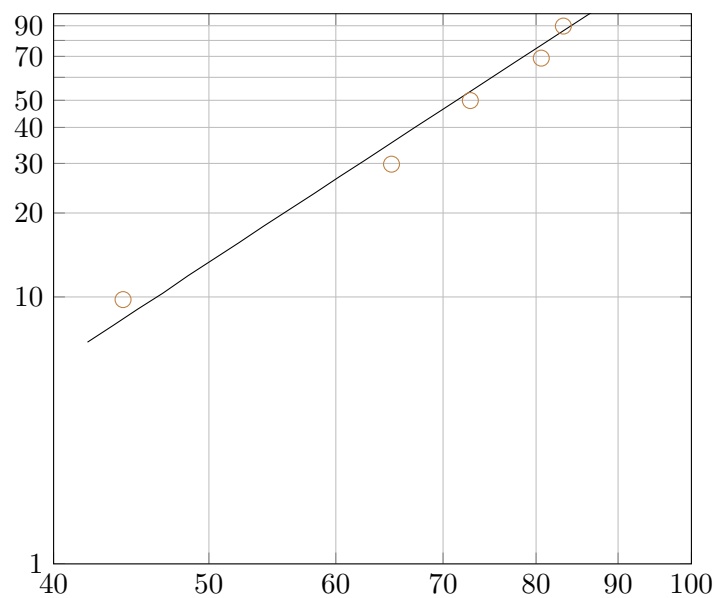
4.2.1 Tørre objekter



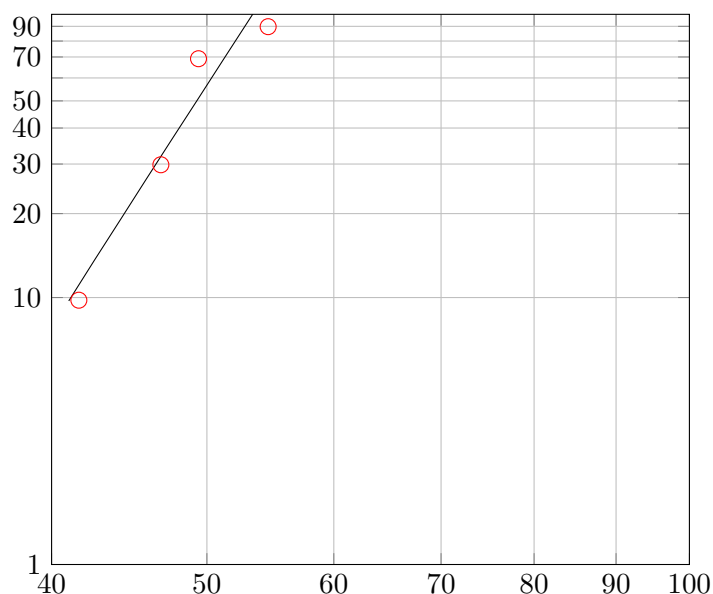
Figur 16: Weibull-plot av gjennomslagsspenningene på tørre koppobjekter i kategori A. Snittverdien er på $79,56\text{ kV/mm}$, og resultatene har moderat spredning.



Figur 17: Weibull-plot av gjennomslagsspenningene på tørre koppobjekter i kategori B. Snittverdien er på 67,08 kV/mm, og resultatene har stor spredning.



Figur 18: Weibull-plot av gjennomslagsspenningene på tørre koppobjekter i kategori C. Snittverdien er på 69,6 kV/mm, og resultatene har stor spredning.



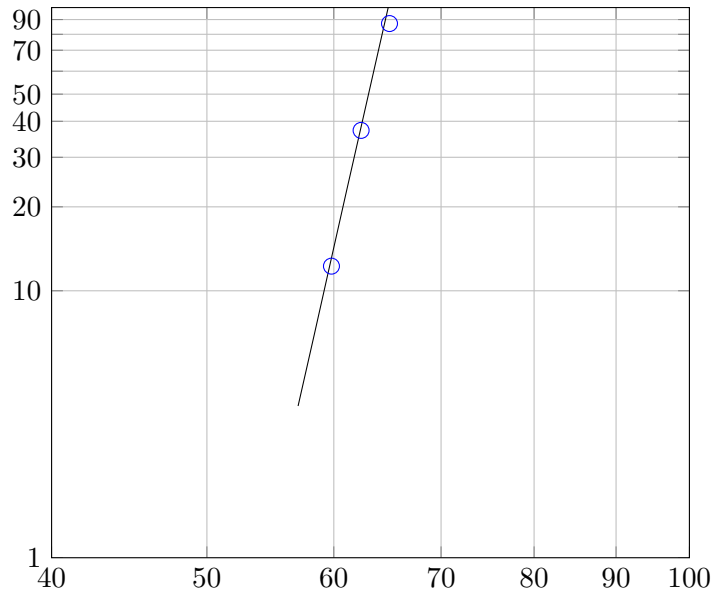
Figur 19: Weibull-plot av gjennomslagsspenningene på tørre koppobjekter i kategori D. Snittverdien er på 48,36 kV/mm, og resultatene har forholdsvis liten spredning.

Kategori	E_{min} [$\frac{kV_{rms}}{mm}$]	E_{max} [$\frac{kV_{rms}}{mm}$]	\bar{E} [$\frac{kV_{rms}}{mm}$]	Standardavvik σ
A	67,6	85,8	79,56	7,49
B	49,4	83,2	67,08	13,18
C	44,2	83,2	69,6	15,66
D	44,2	54,6	48,36	4,72

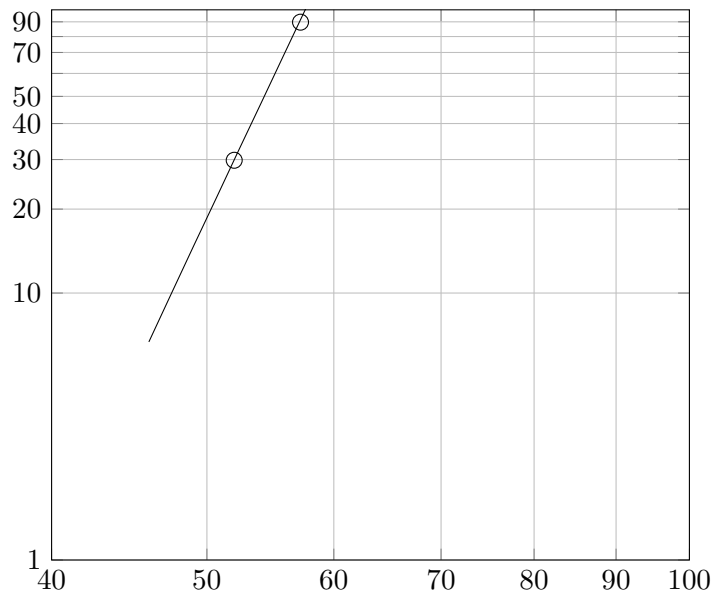
Tabell 6: Gjennomslagsverdier for de tørre testobjektene

Verdiene viser tydelig at objektene med helstøpt bunn (kategori A) har høyest holdfasthet, med snittverdi på 79,59 kV/mm. Ved å introdusere et grensesjikt i midten av objektet (kat. B) senkes holdfastheten i snitt med 15,7%. Resultatene fra kategori B har også stor spredning, hvilket indikerer at det er flere tilfeldige faktorer i objektene i kategori B som har innvirkning på holdfastheten. Objektene med oksiderte partikler (kat. C) har i stor grad den samme holdfasthetskarakteristikken som for kategori B. Dermed kan det ikke påvises at de oksiderte partiklene senker holdfastheten til materialet. Metallpartiklene hadde betydelig innvirkning på holdfastheten, da objektene i kategori D hadde 39,2% lavere snittverdi enn referanseobjekt A. Resultatene i kategori D samsvarte godt og hadde den laveste spredningen av de tørre objektene.

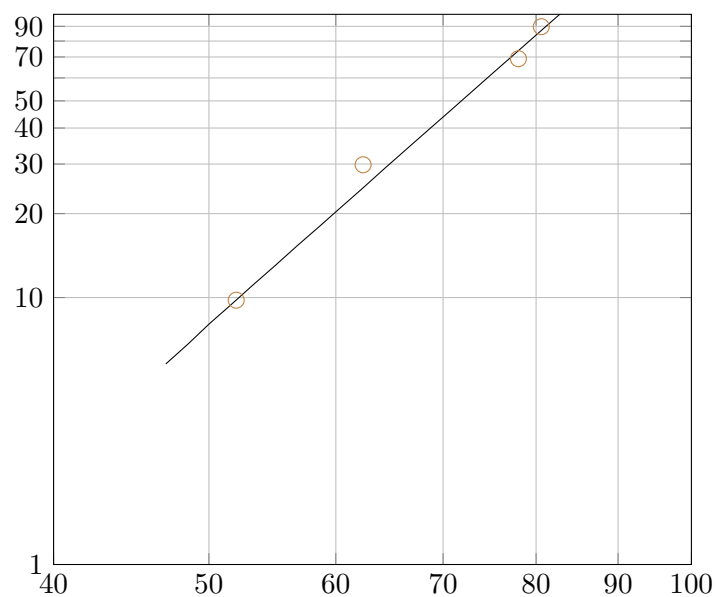
4.2.2 Oppfuktede objekter



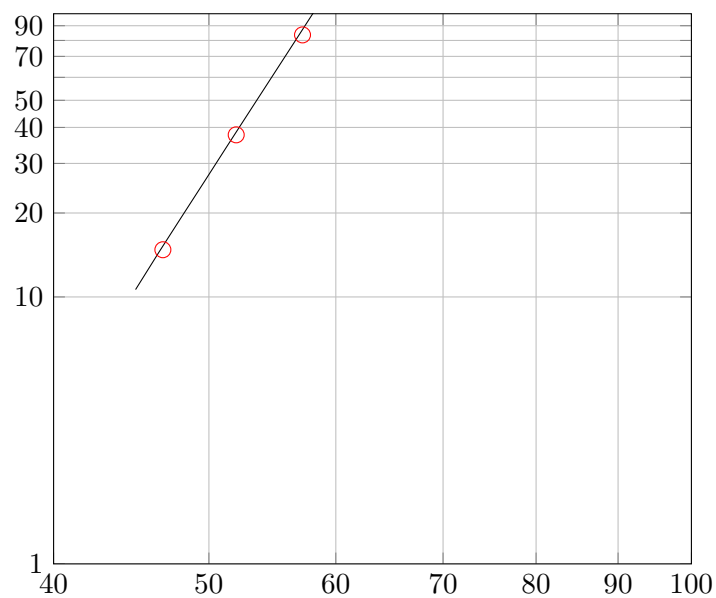
Figur 20: Weibull-plot av gjennomslagsspenningene på fuktete objekter i kategori A. Snittverdien er på 63,05 kV/mm. Liten spredning.



Figur 21: Weibull-plot av gjennomslagsspenningene på fuktete koppobjekter i kategori B. Snittverdien er på 55,12 kV/mm, og resultatene har liten spredning.



Figur 22: Weibull-plot av gjennomslagsspenningene på fuktete koppobjekter i kategori C. Snittverdien er på 70,2 kV/mm, og resultatene har stor spredning.



Figur 23: Weibull-plot av gjennomslagsspenningene på fuktete koppobjekter i kategori D. Snittverdien er på 53,33 kV/mm, og resultatene har forholdsvis liten spredning.

Kategori	$E_{min} [\frac{kV_{rms}}{mm}]$	$E_{max} [\frac{kV_{rms}}{mm}]$	$\bar{E} [\frac{kV_{rms}}{mm}]$	Standardavvik σ
A_F	59,8	65	63,05	2,49
B_F	52	57,2	55,12	2,85
C_F	52	80,6	70,2	12,46
D_F	46,8	57,2	53,33	4,31

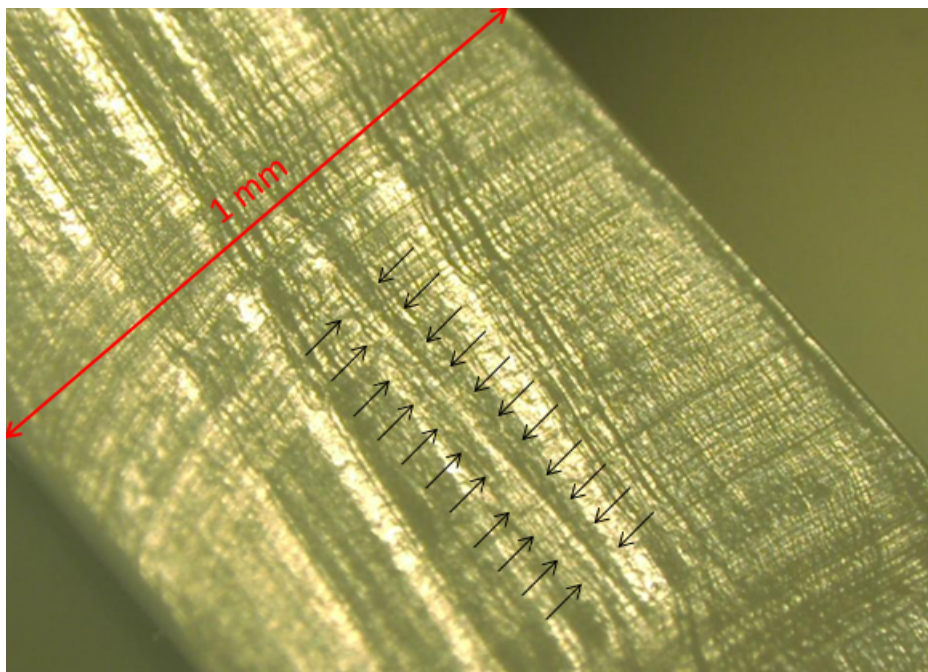
Tabell 7: Gjennomslagsverdier for de fuktete testobjektene

For objektene med helstøpt bunn falt holdfastheten med 20,75%, sammenlignet med de tørre objektene i samme kategori. Resultatene hadde også langt mindre spredning. Slik som for de tørre objektene, var holdfastheten lavere i objektene med grensesjikt (B_F) enn de helstøpte (A_F). Med et standardavvik på 2,85 er verdiene for kategori B_F riktignok langt mer samsvarende enn for de tørre objektene med grensesjikt (B). Objektene med oksiderte partikler (C_F) hadde i stor grad den samme karakteristikken som objektene i C, med omtrent samme snittverdi og stor spredning. Karakteristikken var også merkbart lik for D_F og D, med lav spredning og lav snittverdi på holdfastheten.

Kategori	$\bar{E}_{min} [\frac{kV_{rms}}{mm}]$	$\bar{E}_{max} [\frac{kV_{rms}}{mm}]$	$\bar{E} [\frac{kV_{rms}}{mm}]$	Standardavvik σ
Tørre	51,35	76,6	66,15	10,26
Fuktete	52,65	65	60,42	5,54

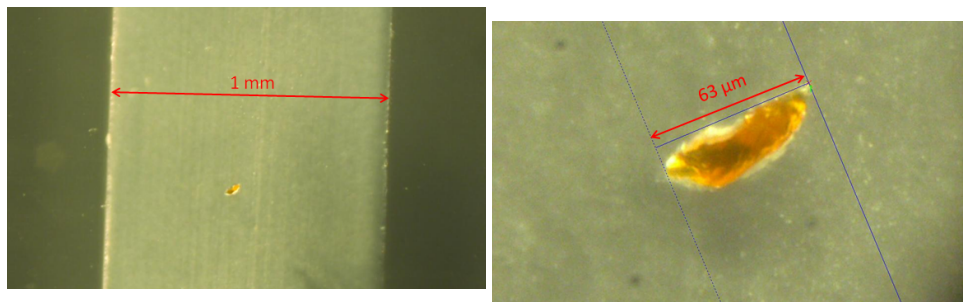
Tabell 8: Sammenligning av snittverdier for tørre og fuktete objekter

4.3 Mikroskopanalyse



Figur 24: Grensesjikt i koppobjekt

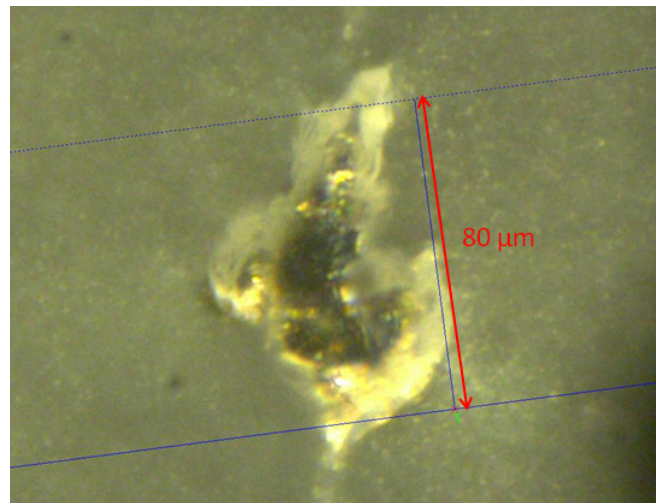
Grensesjiktet i objekt B, C og D kan ikke skimtes med det blotte øye. Først når tverrsnittet av objektene forstørres er det mulig å se linja der plasten er støpt sammen. Gjennomslagstestene viser at grensesjiktet senker holdfastheten til materialet. Likevel er det ikke lokalisert hulrom eller andre urenheter i dette sjiktet, andre enn de som med hensikt er plassert der. Analysene viser også at grensesjiktet ligger forskøvet $50 \mu\text{m}$ fra midten. Dette kan antas å ha neglisjerbar effekt på spenningstestene, da det påtrykte feltet er uniformt gjennom det flate partiet av objektene.



(a) Tverrsnitt av objekt med oksidert partikkel

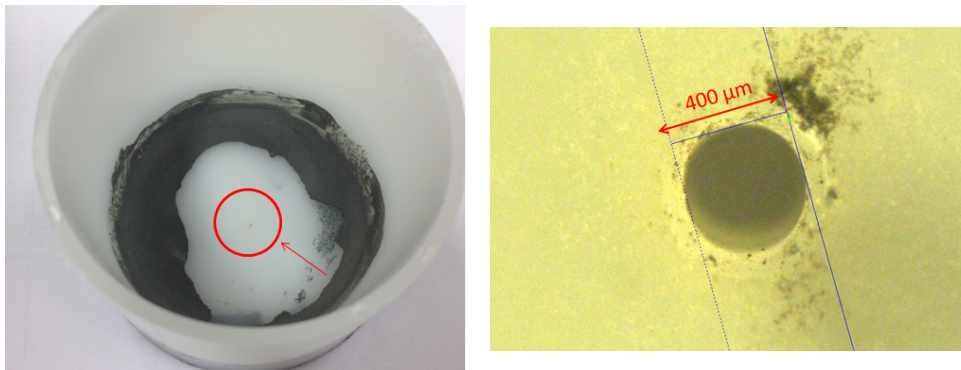
(b) Oksidert partikkel

Figur 25: Oksidert partikkel fra tørt objekt: Ingen synlig trevekst fra partikkelen, selv om den ligger med skarpe kanter i retning av feltet. Partikkelen er trolig en utskåret del av en større partikkel.



Figur 26: Metallpartikkel i en strimlet skive fra kategori D

Det er ikke påvist tilfeller av trevekst fra hverken de oksiderte partiklene eller metallpartiklene. Rundt metallpartiklene lå det større partier med hvitt/ugjennomsiktig plastmateriale. Dette kan tyde på dårligere heft mellom isolasjonen og metallpartiklene, og dertil større risiko for hulrom mellom partikkelen og materialet. De oksiderte partiklene var tilsynelatende bedre omsvøpt av materialet.



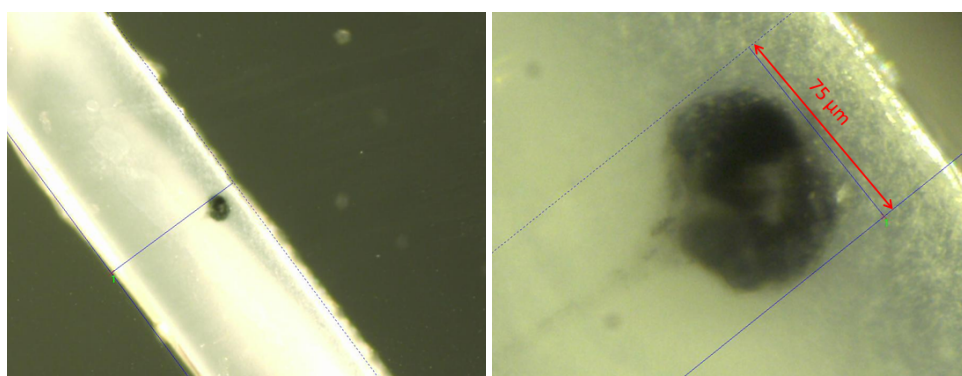
Figur 27: Gjennomslagspunkt i koppobjekt

Alle de vellykkede gjennomslagene har gått gjennom midten av koppens bunn, der det elektriske feltet er uniformt. I gjennomslagspunktet er isolasjonsmaterialet totalt destruert. Det er derfor ikke mulig å analysere opprinnelsepunktet for sammenbruddet.

5 Diskusjon

5.1 Oksidering

FTIR-målingene av partiklene lokalisert i kabellengdene (vedlegg A) mislyktes, fordi partiklene var for små. Dermed var deres kjemiske sammensetning, og følgelig grad av oksidasjon, ikke mulig å påvise. Likevel er det rimelig å anta disse var kraftig oksidert, på grunn av deres meget mørke farge. Mørkere farge indikerer høy grad av oksidasjon[14].



Figur 28: Oksidert partikkel lokalisert i ROC-2

Oksideringskurver for polyetylen ved 140°C viser at oksidasjonsraten er avtagende etter ~ 200 timer; ved 500 timer er oksygenopptaket marginalt økende med tid[9]. Materialet i dette studiet ble aldret i 480 timer, ved 170°C . I tillegg viste absorpsjonsspekteret høy forekomst av oksidasjonsprodukter. Derfor kan det, med rimelig tilnærming, antas at det allerede materialet oppnådde en tilfredsstillende lik grad av oksidasjon som den i partiklene.

5.2 Dielektrisk holdfasthet

5.2.1 Tørre objekter

De helstøpte koppene hadde høyest holdfasthet av testobjektene, med snittverdi på $79,56 \text{ kV/mm}$. Ved å introdusere et grensesjikt i objektet sank holdfastheten i snitt med $15,7\%$, dog med høy spredning i resultatene. Selv om det ikke ble lokalisert noen irregulariteter i grensesjiktet er dette likevel et område som er sårbart for inntreden av uønskede partikler eller hulrom. Slike irregulariteter kan forårsake lokale feltforsterkninger og bli initeringspunkter for partielle utladninger. Gjennomslagstestene indikerer at objektene i kategori B også er rammet av slike irregulariteter, i varierende grad.

Objektene med innstøpte oksiderte partikler viste i all hovedsak den samme holdfasthetskarakteristikken som objektene i kategori B. Det ble heller ikke funnet tilfeller av elektrisk trevekst med utspring fra partiklene. Trolig har varigheten på testene vært for kort til å utvikle trevekst i en synlig størrelsesorden. Dermed kan det ikke påvises noen sammenheng mellom oksiderte partikler og holdfasthet ved korttids AC-tester. Dersom spenningspåtrykket i testene gikk over et bredere tidsintervall, ville de oksiderte partiklene med større sannsynlighet kunne bli opprinnelsepunkter for trevekst[22]. I så fall kunne de oksiderte partiklens destruktive effekt på isolasjonsmaterialet, påvises.

Metallpartiklene forringet materialets holdfasthet betraktelig, med nesten 40% i forhold til objektene i kategori A. Dette kommer sannsynligvis av at partiklens høye konduktivitet gjør at partiklene kan betraktes som flytende potensialer mellom elektrodene. Det innebærer at partiklene i et elektrisk felt lett vil polarises slik at de setter opp et høyt elektrisk felt i motsatt retning av feltet mellom elektrodene. Dermed kan det elektriske feltet mellom elektrodene og partikkelen bli høyere, og raskere overskride materialets holdfasthet. Metallpartiklene har også en helt annen kjemisk komposisjon enn isolasjonsmaterialet. Dermed er trolig heften mellom dem dårlig, og det kan lettere oppstå hulrom mellom partiklene og platen. I hulrommene vil det kunne initieres partielle utladninger. Det kan også ha vært av betydning at metallpartiklene var mer irregulære i formen enn de oksiderte partiklene, slik at hver partikkel hadde flere skarpe kanter.

5.2.2 Fuktete objekter

For objektene uten partikler sank holdfastheten i snitt med 20,75% og 17,83% for henholdsvis kategori A og kategori B, ved diffundering av vann i materialet. Derfor bør effekten av fukt tas i betraktning, også i fremtidig spenningstesting av materialet. Resultatene viser også langt mindre spredning for de fuktete objektene i kategori A og B, sammenlignet med de tørre. Dette kan indikere at fukting av materialet gir større forutsigbarhet av utfallene. Uansett krever det et bredere statistisk grunnlag før det kan fattes som en konklusjon.

5.3 Resultatenes betydning for videre testutvikling

Resultatene i dette studiet kan ikke direkte relateres til materialets holdfasthet ved DC-påtrykk. Dette skyldes at nedbrytningsmekanismene er forskjellige for AC og DC. Likevel yter resultatene en god referanse for andre typer spenningspåtrykk. VLF-testing har vist å ha en rekke fordeler ved kvalitets-testing av polymerisolert kabel[23]. Dermed kan VLF også være interessant

ved videre testing av ROC-2. Studier utført på XLPE-materiale viser at spenningspåtrykket må være 2 ganger så høyt ved VLF-påtrykk (0,01 Hz) for å oppnå gjennomslag på tester med samme varighet som for AC[24]. Ved å etablere en tilsvarende korrelasjon mellom AC- og VLF-påtrykk på isolasjonsmaterialet til ROC-2 vil eventuelle fremtidige AC-tester alene kunne gi ytterligere indikatorer på kabelens holdfasthet.

AC-testingen har også avdekket en svakhet ved metoden benyttet i dette studiet. Grensesjiktet i objektene er trolig utsatt for irregulariteter som senker objektets holdfasthet. Disse irregularitetene kan også påvirke holdfastheten ved andre typer spenningstester. Metoden har dog vært anvendelig for objektene i kategori D, der effekten av metallpartiklene var rådende over effekten av grensesjiktet. For de oksiderte partiklene var metoden derimot mangelfull i å karakterisere partiklenes innvirkning.

6 Konklusjon

I dette arbeidet er det gjort AC gjennomslagstester på Rogowski-objekter av HDPE, med forskjellige typer interne partikler. Formålet har vært å undersøke oksiderte partiklers innvirkning på holdfastheten til isolasjonsmaterialet. Resultatene skal danne grunnlaget for videre testing av materialet, med den hensikt å finne frem til passende testmetoder for ROC-2. De viktigste konklusjonene fra arbeidet er som følger:

- Testobjekter med grensesjikt har lavere holdfasthet enn helstøpte testobjekter. Dette skyldes trolig at det havner partikler eller hulrom på grenseflaten, som forårsaker lokale feltforsterkninger under spenningspåtrykk.
- Effekten av interne oksiderte partikler kunne ikke påvises, da testresultatene fra denne kategorien med objekter var tilnærmet like resultatene fra objektene som kun hadde grensesjikt.
- Materialets holdfasthet er betydelig svekket ved inntreden av metallpartikler. Dette kan komme av partiklenes høye konduktivitet, og dårlig heft mellom isolasjonsmaterialet og partiklene.
- Ved fukting av materialet svekkes gjennomslagsstyrken for objektene uten partikler, med omtrent 20%. Hverken objektene med oksiderte partikler eller de med metallpartikler viser noen merkbar endring i holdfasthetskarakteristikk. Likevel bør betydningen av fukt tas i betraktning i fremtidig spenningstesting av materialet.

7 Videre arbeid

For å anslå kabelens levetid kreves ytterligere testing av isolasjonsmaterialet. Som en overordnet bemerkning oppfordres det videre til å gjøre tester som gransker gradvis elektrisk nedbrytning og langtidseffekter.

DC pre-stressing: I og med at ROC-2 er en likestrømskabel er det ønskelig å finne ut hvilken effekt DC-påtrykk har på materialet over tid. For å fremprovosere gjennomslag kun ved hjelp av DC vil det kreves et meget høyt spenningsnivå eller svært lang tid. En løsning kan være å kombinere DC-påtrykk med påfølgende testing ved andre typer spenningspåtrykk. Ved å gjøre gjennomslagstester på objekter som først er utsatt for DC-påtrykk av forskjellig styrke og varighet kan holdfastheten vurderes mot DC-påtrykket.

VLF: Som nevnt i kapittel 5 kan VLF være en aktuell testmetode for å avdekke urenheter i ROC-2. Det kan derfor være interessant å etablere en korrelasjon mellom AC- og VLF-påtrykk. En slik sammenheng kan gi nyttige indikatorer ved utvikling av spenningstester for kabelen.

Initiering av trevekst: Elektrisk trevekst i et isolasjonssystem kan i ytterste konsekvens føre til havari av kabelen. Derfor er det interessant å vite ved hvilke terskelspenninger elektrisk trevekst initieres. Begynnende trevekst har vist å avgi lysstråling selv uten forekomst av partielle utladninger fra initieringspunktet[21]. Dette kan måles ved å påtrykke spenning på en prøve av materialet for så å måle lysavgivningen med en sensitiv lysreseptor.

Testing av skjøt: I DC-drevne fiberoptiske kabler med forsterkere er gjennomslagsstyrken lavere i skjøtene enn selve kablene. Dette skyldes irregulærheter som legger seg i grensesjiktet mellom hovedisolasjonen og den injeksjonsstøpte isolasjonen, i skjøten[25]. Da det er en tendens at skjøtene utgjør de svakeste punktene i kabelsystemet, bør urenheter herfra undersøkes på lik linje som urenheter fra kablene. Ved å påtrykke skjøten spenning, for så å gjøre elektriske og akustiske PD-målinger, kan slike irregulærheter lokaliseres. Området i isolasjonen der utladningene forekommer kan så skjæres ut for visuell inspeksjon.

Karakterisering av oksidasjon: Selv om det i dette studiet ikke er påvist en sammenheng mellom oksiderte partikler og holdfasthet, kan slike partikler likevel gjøre et utslag i andre typer tester. Det kan derfor være interessant å lokalisere flere oksiderte partikler fra produksjonsprosessen. Slike kan finnes ved å analysere partier med pellets, enten i en automatisk scanner eller ved manuell inspeksjon. FTIR-målinger av potensielle funn kan benyttes til å aldre friskt isolasjonsmateriale til det oppnår samme oksidasjonsgrad som partiklene. Videre vil det være interessant å gjøre dielektriske målinger på aldret materiale, for å dokumentere hvordan materialets elektriske egenskaper endrer seg med grad av oksidasjon.

Referanser

- [1] K. Thyagarajan, Ajoy Ghatak, *"The Fiber Optic Essentials"*, Piscataway, N.J., IEEE Press, side 1, 2007
- [2] *"Total Submarine Cabling Solutions"*, Nexans, (Brosjyre)
- [3] L. A. Dissado, J. C. Fothergill *"Electrical Degradation and Breakdown in Polymers"*, IET, 1992
- [4] A. Barlow, *"The Chemistry of Polyethylene Insulation"*, IEEE Electrical Insulation Magazine, 1991
- [5] E. Ildstad, *"High Voltage Insulation Materials"*, Institutt for elkraftteknikk, NTNU, august 2012
- [6] T. Kelen, *"Polymer Degradation"*, Van Nostrand Reinhold Company, 1983
- [7] B. Baum, *"The Mechanism of Polyethylene Oxidation"*, J. Appl. Polym. Sci., 2: 281–288. doi: 10.1002/app.1959
- [8] N. T. Notley, *"Thermal Oxidation of Polyethylene"*, Trans. Faraday Soc., 1962
- [9] W. L. Hawkins *"Thermal and oxidative degradation of polymers"*, Polymer Engineering and Science, volume 4, issue 3, 1964
- [10] B. Stuart, *"Infrared Spectroscopy: Fundamentals and applications"*, Wiley, 2004
- [11] J. M. Holl, *"Basic Atomic and Molecular Spectroscopy"*, The Royal Society of Chemistry, 2002
- [12] J. Coates, *"Interpretation of Infrared Spectra, A Practical Approach"*, Encyclopedia of Analytical Chemistry, 2000
- [13] G. Mazzanti, M. Marzinotto, *"Extruded Cables for High-Voltage Direct Current Transmission"*, Wiley, 2013
- [14] S. Hvidsten, M. Vandbakk, F. Mauseth, *"Dielectric Properties of Organic Contaminations in XLPE Cable Insulation"*, to be presented at the 2012 Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), Montreal, Canada, October 14-17, 2012
- [15] J. O. Bostrøm, E. Marsden, R. N. Hampton, U. Nilsson, H. Lennartsson, *"Electrical Stress Enhancement of Contaminants in XLPE Insulation Used for Power Cables"*, IEEE Electrical Insulation Magazine, pp. 6-12, Vol. 19, No. 4, July/August 2003

- [16] J. R. Antonischki, U. H. Nilsson, S. M. Gubanski, "*Influence of Metal Inclusions on the Breakdown Strength of Model Cables*", Proc. CEIPD, Minneapolis, pp. 283-286, 1997
- [17] P. H. F. Morshuis, F. H. Kreuger, P. P. Leufkens, "*The Effect of Different Types of Inclusions on PE Cable Life*", IEEE Trans. on El. ins., Vol. 23, No. 6, pp. 1051-1055, 1988
- [18] R. N. Hampton, "*Some of the Considerations for Materials Operating Under High-Voltage, Direct-Current Stresses*", Electrical Insulating Magazine, IEEE, Volume:24, Issue: 1, 2008
- [19] M. J. P. Jeroense, P. H. F. Morshuis, "*Electric Fields in HVDC Paper-Insulated Cables*", IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 5, pp. 225-236, 1998
- [20] University of Leicester [internett-side], <http://www2.le.ac.uk/departments/engineering/research/electrical-power/electrical-insulation-and-dielectric-phenomena>
- [21] L. A. Dissado "*Understanding Electrical Trees in Solids: From Experiment to Theory*", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 9, no. 4; August 2002
- [22] E. Doedens, A. Johansson, M. Jarvid, S. Nilson, M. Bengtsson, J. Kjellqvist, "*Effects of Inclusions of Oxidized Particles in XLPE on Treeing Phenomena*", Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), pp. 597-600, 2012
- [23] H. R. Gnerlich, "*Field Testing of HV Power Cables: Understanding VLF Testing*", IEEE Electrical Insulation Magazine, 1995, Vol. 11, No. 5: pp. 13-16
- [24] F. Mauseth, E. Ildstad, M. Ytterstad, R. Hegerberg, B. Sanden, M. Jeroense, J. E. Skog, "*Quality Control of HVDC Extruded Cables: Electrical Treeing in XLPE Under Different Voltage Stresses*", 16th International Symposium on High Voltage Engineering, South African Institute of Electrical Engineers, ISBN 9780620445856, 2009
- [25] Dissado, Doble, Wolfe, Norman, Davies, Chen, Zhong, Wargotz, Sanders, "*Electrical Reliability of DC-operated Submarine Telecommunications Cables*", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 4 no. 1, 1997

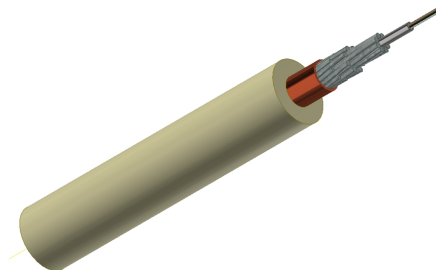
A Partikkelfunn i kabellengder

[Dette er et utdrag av en rapport fra et tidligere studie av ROC-2.]

Metode

Testobjektet

Kabelen består av fiberoptikk, armering, leder og isolasjon. I kjernen ligger 12 optiske fibre plassert i et stålrør. Stålrøret er fylt med en gel som absorberer hydrogen samt blokkerer vannintrengning ved brudd på kabelen. Tvinnet rundt stålrøret ligger armeringen av ståltråder. Denne yter beskyttelse mot ytre mekaniske påkjenninger og strekkrefter ved legging av kabelen. Stålrøret og armeringen bidrar også til kabelens elektriske ledeevne. Hovedlederen er et kobberør med 0.55 mm tykke vegger, som omslutter armeringen. Isolasjonen består av 4.5 mm HDPE og utgjør det ytterste laget på kabelen.



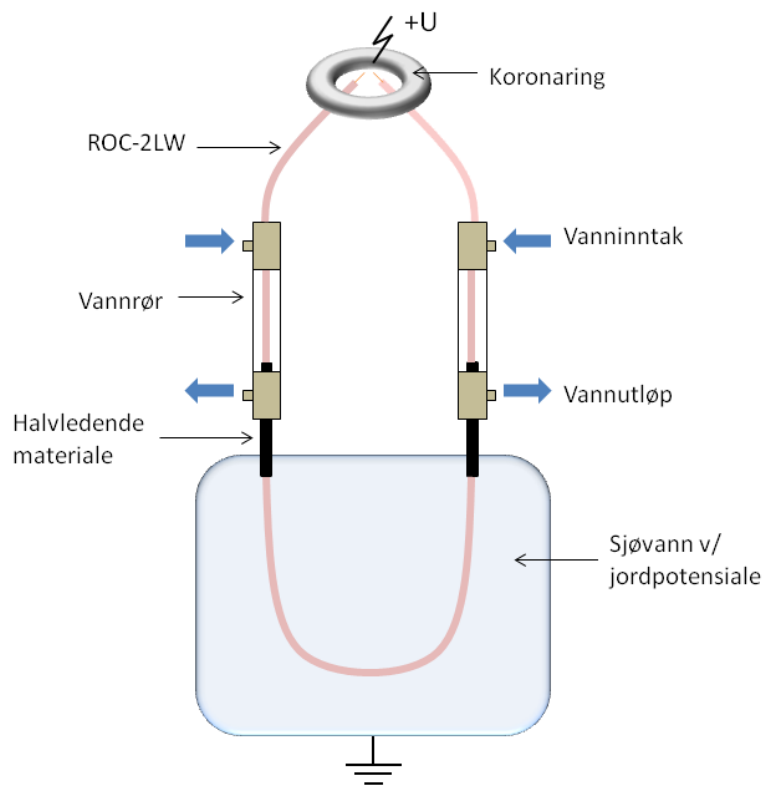
Figur 29: ROC-2LW: Illustrasjon som demonstrerer de forskjellige lagene i kabelen.

AC gjennomslagstester

Terminering

I forsøket ble det brukt kabellengder på 10 meter. For å kontrollere feltet ble det benyttet vannterminering. Kabelen ble påmalt halvledende maling 2 m inn fra hver ende. De ble malt over et område på 40 cm. Deretter ble det kveilet halvledende mastic tape for å beskytte malingen fra ytre påkjenninger, slik at den ikke ble skrapet av i kontakt med vannrøret. For å tilpasse tykkelsen på området av kabelen der pakningene skulle skrus på, ble

det kveilet isolerende tape utenpå laget med halvledende tape. Kabelendene ble så ført inn i vannrørene og festet med pakninger som hindrer vann i å trenge ut av vannrøret. Hvert vannrør hadde inn- og uttak av vann som således sirkulerte gjennom røret og kjølte ned endeavslutningene av testobjektet. Prøveobjektet ble montert slik at den halvledende malingen lå i kontakt med sjøvannet, og dermed var koblet til jordpotensialet. En spiker ble slått inn i stålrøret i hver ende og en ledende metalltråd ble kveilet rundt hver spiker. Denne metalltråden ble så påsatt spenning. For å styre feltet rundt kontaktpunktet ble det satt på en koronaring.



Figur 30: Terminering og testoppsett

Oppkobling

Prøveobjektet ble plassert i et kar fylt med sjøvann. I karet ble det plassert en jordelektrode. For å sikre at kabelens overflate var i god kontakt med jordpotensialet ble det kveilet en metalltråd rundt kabeloverflaten, med kobling

til jordelektroden.

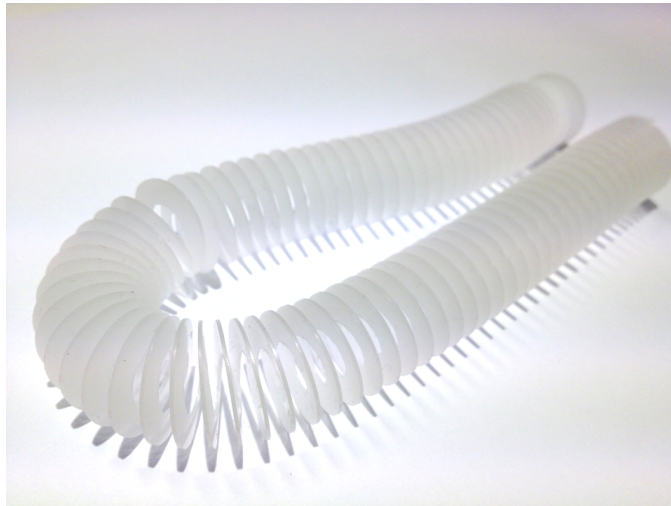
Prosedyre

AC spenning ved 50 Hz ble påtrykt, med en startspenning på 20 kV. Hvert femte minutt ble spenningen økt med 5 kV. Denne prosedyren ble gjentatt inntil gjennomslag ble oppnådd på prøveobjektet. Ved gjennomslag ble spenningen slått av, alle spenningsatte komponenter jordet og prøveobjektet hentet ut. Hvert forsøk ble tatt opp på film. Dermed kunne punkteringen lettere lokaliseres, ved å se hvor på kabelen lysbuen gikk.

Mikroskopanalyse

Spiralisering

Fra hvert prøveobjekt ble området med punkteringen sagt ut med 10 cm kabellengde på hver side. For å kunne spiraliseres isolasjonen måtte lederen først trekkes ut. Grunnet stor heft mellom leder og isolasjon, i tillegg til kabelens små dimensjoner, ble det funnet at den mest egnede måten å trekke ut lederen på var å bore den ut. Boret som ble brukt hadde 1 mm større diameter enn lederen, for å sikre at hele lederen ble fjernet. Isolasjonen ble så montert fast i en dreiebenk og dreid aksielt mot en kniv som skar den i spiraler med en snittykkelse på 0.5 mm.



Figur 31: Spiralisert isolasjonsmateriale

Visuell inspeksjon med lupe

Først ble det utført en grov inspeksjon av isolasjonen. Hver spiral ble studert med baklys gjennom en arbeidslupe. Før gjennomlysning ble de blåst med trykkluft for å blåse vekk støvkorn og løse partikler, da disse kan forveksles med urenheter som ligger inne i isolasjonen. Ved funn av partikler eller uregelmessigheter ble skiven denne satt i klipt ut og lagt til side for nærmere inspeksjon. Dette er en effektiv metode å benytte for å lokalisere urenheter ned til en skala på omkring 100 μm .

Visuell inspeksjon med mikroskop

Skivene som ble klipt ut i løpet av den grove inspeksjonen ble studert nærmere i mikroskop. Mikroskopet og isolasjonsskivene ble rengjort med isopropanol og trykkluft. En skive ble så plassert mellom preparatbordet og en glassplate. Dette for at den skulle ligge i ro og bli presset mest mulig flat, for å holde et jevnt fokus ved sidejustering av preparatbordet. Skiven ble først opplyst undenfra og studert med 100x forstørring. Uregelmessigheten som ble funnet under den grove inspeksjonen kunne så skimtes som et definert, mørkt område på den transparente skiven. Dernest ble objektivet justert til 1000x forstørring. Underlyset ble slått av og erstattet med en lyskilde med fiberoptiske armer, som ble stilt inn til å belyse skiven ovenfra og fra siden. Med denne belysningen ble lyset reflektert slik at det ble mulig å fastslå urenhetsens farge og type. For hver urenheter ble det loggført type, form, farge, størrelse og plassering i forhold til lederen.

Resultater

AC gjennomslagstester på kabellengder

Seks kabellengder ble testet til gjennomslag. Gjennomslagsspenningene er summert opp i tabellen nedenfor. Alle spenningsverdier er oppgitt som RMS-verdier.

Prøveobjekt nr	Gjennomslagsspenning [kV]	Kommentar
1	135	
2	105	Forsøket ble avbrutt på 25 kV og startet på nytt fra 20 kV.
3	140	Avbrutt på 35 kV. Prøveobjektet ble jordet, og så gjenopptatt fra 35 kV. Forsøket ble igjen avbrutt på 50 kV. Prøveobjektet ble jordet, og så gjenopptatt fra 50 kV.
4	125	
5	99	
6	140	

Tabell 9: AC gjennomslagsspenninger

Irregulariteter i hovedisolasjon

Visuell inspeksjon med lupe

I alt ble det funnet 38 potensielle urenheter ved grov inspeksjon. 16 av disse ble funnet i prøve nummer 4. Færrest ble funnet i prøve nummer 2, med kun to potensielle urenheter. Alle ble tatt ut og lagt til side for videre oppfølging. Under inspeksjonen med lupe ble det funnet partikler ned til $65 \mu\text{m}$, hvilket demonstrerer at de fleste partikler i en skadelig størrelsesorden ($>70 \mu\text{m}$ [15]) ble fanget opp ved hjelp av denne metoden. Hvorvidt det fantes tilfeller av skarpe utstikkere fra lederen var ikke mulig å vurdere, da lederen og det innerste laget av isolasjonen ble ødelagt ved uttrekking av lederen.

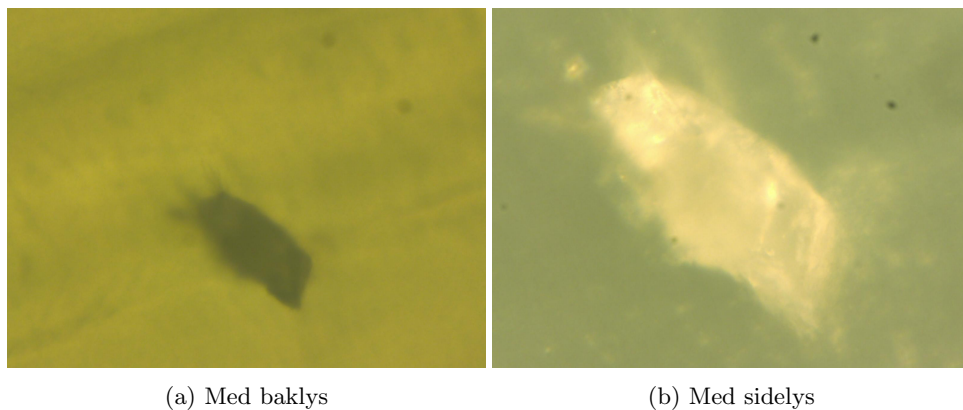
Visuell inspeksjon med mikroskop

Gjennom mikroskopet ble det tydelig hvorvidt de potensielle urenheterne faktisk var urenheter eller ikke. 10 av funnene fra den grove inspeksjonen ble forkastet, da de viste seg å være skrammer og ytre skader fra spiraleringen. De resterende 28 urenheterne ble klassifisert som hulrom, metallpartikler og oksidert materiale. Forekomsten av hver type urenheter er gitt i tabell 2. Full oversikt og karakterisering av urenheterne finnes i Tillegg A.

Type	Antall
Hulrom	21
Oksidert materiale	6
Metallpartikler	1

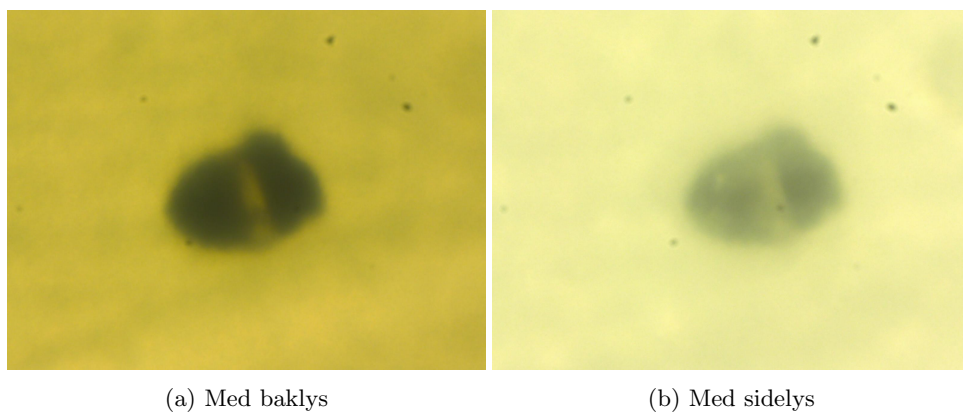
Tabell 10: Funn av urenheter

Det ble gjort flest funn av hulrom. De forekom i størrelser fra 65-200 μm . Det største hulrommet, på 200 μm , var også den største urenheten som ble funnet.



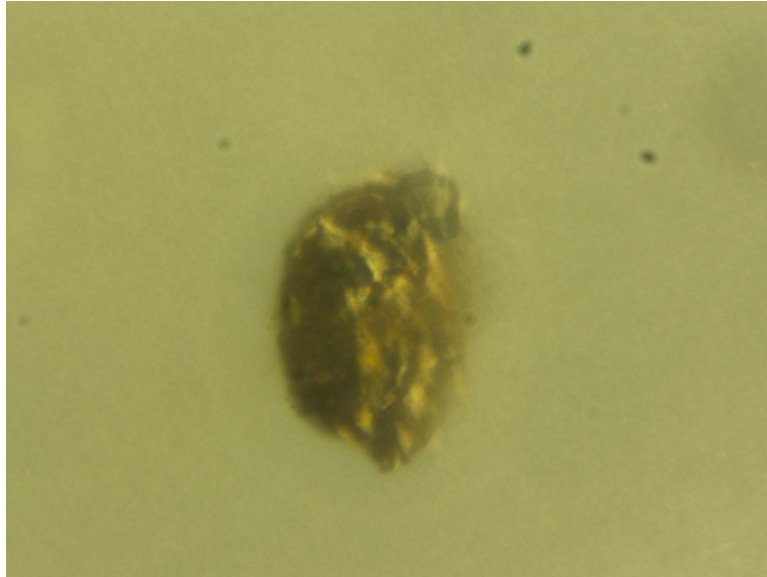
Figur 32: Hulrom

Det ble gjort seks funn av oksidert materiale i isolasjonen, fra 60-110 μm .



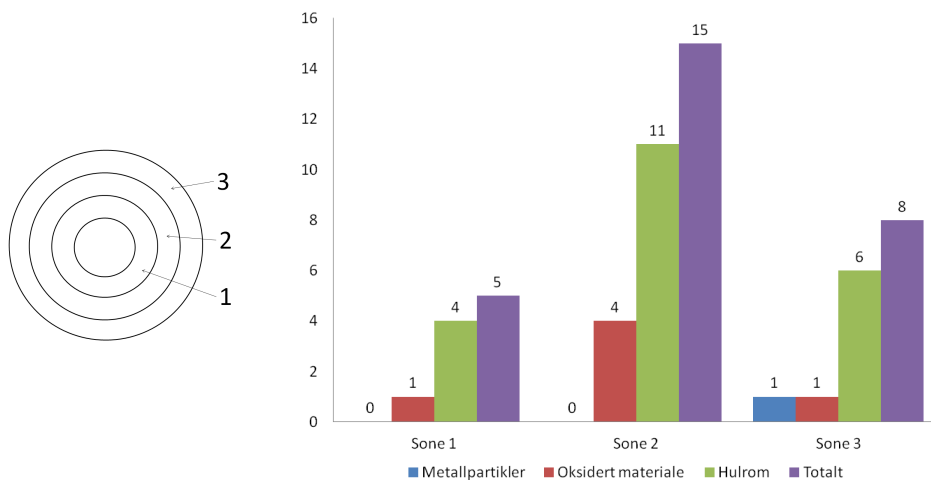
Figur 33: Oksidert partikkel

Én metallpartikkel ble funnet, i prøveobjekt 4. Den var $120\ \mu\text{m}$ lang, med gylden, kobberaktig farge.



Figur 34: Metallpartikkel

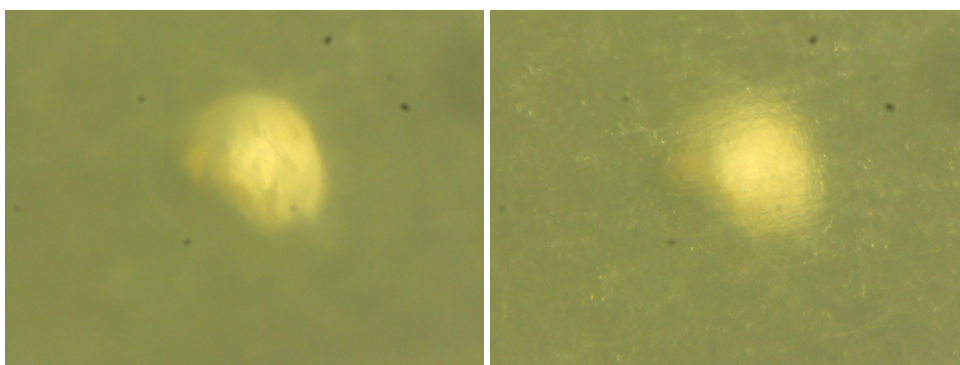
Spiralskivene ble delt i tre soner for å indikere urenhetenes radielle plassering. Urenhetene havner i materialet etter et heller tilfeldig mønster. En tredelt soneinndeling gir derfor tilstrekkelig presisjon i å indikere tendenser i urenhetenes plassering. Figur 10 viser at over 50 prosent av urenhetenes lå i den midtre regionen av isolasjonen.



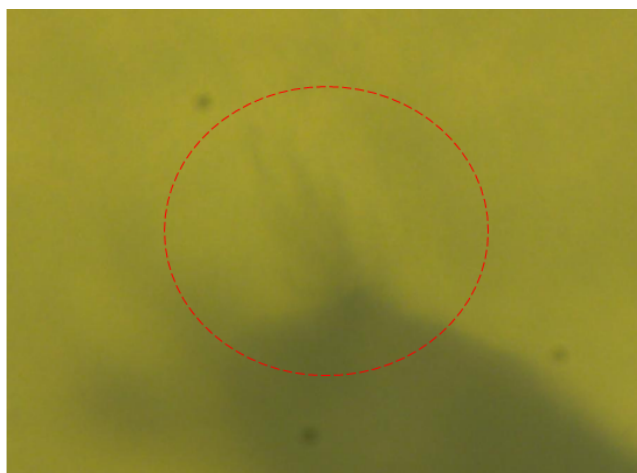
Figur 35: Urenhetenes plasseringer

Pålitelighet

Resultatene er basert på tolkning fra visuell inspeksjon og er i så måte kvalitative resultater. For å karakterisere urenheten med større presisjon må det benyttes utstyr som måler deres elektriske egenskaper. Likevel kan det fastslås at urenheten inntrådte i produksjonen av kabelen, og ikke er skader eller partikler fra spiraleringen eller annen behandling. Dette blir klart ved å justere dybdefokuset slik at det synliggjør hvorvidt urenheten ligger under overflaten på isolasjonen eller ikke. Det ble også funnet et tilfelle av elektrisk trevekst på et av hulrommene. Dette viser at hulrommet var tilstede under spenningstestene, før isolasjonen ble skåret i.



Figur 36: Ved å justere dybdefokuset blir det klart at hulrommet ligger under overflaten



Figur 37: Trevekst på hulrom

B Gjennomslagsverdier

Tørre objekter

Koppobjekt	$E_{gjennomslag} \left[\frac{kV_{rms}}{mm} \right]$	Koppobjekt	$E_{gjennomslag} \left[\frac{kV_{rms}}{mm} \right]$
A1	85,8	B1	49,4
A2	80,6	B2	83,2
A3	67,6	B3	67,6
A4	85,8	B4	75,4
A5	78	B5	59,8

Koppobjekt	$E_{gjennomslag} \left[\frac{kV_{rms}}{mm} \right]$	Koppobjekt	$E_{gjennomslag} \left[\frac{kV_{rms}}{mm} \right]$
C1	80,6	D1	49,4
C2	83,2	D2	49,4
C3	72,8	D3	41,6
C4	44,2	D4	46,8
C5	65	D5	54,6

Fuktede objekter

Koppobjekt	$E_{gjennomslag} \left[\frac{kV_{rms}}{mm} \right]$	Koppobjekt	$E_{gjennomslag} \left[\frac{kV_{rms}}{mm} \right]$
A1 _F	65	B1 _F	57,2
A2 _F	65	B2 _F	57,2
A3 _F	59,8	B3 _F	52
A4 _F	62,4	B4 _F	57,2
		B5 _F	52

Koppobjekt	$E_{gjennomslag} \left[\frac{kV_{rms}}{mm} \right]$	Koppobjekt	$E_{gjennomslag} \left[\frac{kV_{rms}}{mm} \right]$
C1 _F	62,4	D1 _F	57,2
C2 _F	80,6	D2 _F	46,8
C3 _F	78	D3 _F	57,2
C4 _F	78	D4 _F	52
C5 _F	52	D5 _F	(mislykket)

C Beregning av elektrisk felt

Den elektriske felt-distribusjonen i en koaksialkabel er gitt ved

$$E = \frac{U}{r * \ln\left(\frac{r_y}{r_i}\right)}, \quad (19)$$

der E er det elektriske feltet, U er påtrykt spenning i kV, r er avstand fra lederen, r_y er kabelens ytterste radius og r_i er radius ved lederen.

Gjennomsnittlig felt i samme kabelkonfigurasjon er gitt ved

$$\bar{E} = \frac{U}{r_y - r_i} \quad (20)$$