

Tilstandskontroll av mellomspennet kabelutstyr

Innvirkning av fukt og temperatur på
feltstyrende krympestrømper

Magnus Esp Aase

Master of Science in Electric Power Engineering
Innlevert: juni 2016
Hovedveileder: Frank Mauseth, ELKRAFT
Medveileder: Sverre Hvidsten, SINTEF Energy

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Institutt for elkraftteknikk

Oppgavetekst

A significant part of the Norwegian medium voltage cable distribution net is older than the expected lifetime of 30 years. Cable joints have a shorter expected lifetime than the cable. In case of heat-shrink joints installed in the 80's, many service failures have occurred due to over-heating of the metallic connector. In general, the condition of the insulation of the joints can be assessed by partial discharge measurements or dielectric spectroscopy. For joints and terminations, field grading materials (FGM) are often used to achieve the wanted field distribution to avoid local field enhancement and partial discharges. The dielectric properties of the FGM will also be influenced by the frequency of the applied voltage, but also humidity and temperature will influence the resulting field distribution. The master thesis work will be mainly experimental. Field grading material will be characterized in new and thermally aged condition as function of humidity, temperature and electric field.

Forord

Dette er en avsluttende hovedoppgave for siste semester ved studieretningen Electric Power Engineering, ved Norges teknisk-naturvitenskaplige universitet (NTNU).

Oppgaven vektet 30 studiepoeng, noe som tilsvarer hele studieprogresjonen for et normalt semester. Masteroppgaven er gitt på bakgrunn av et samarbeid mellom SINTEF Energi AS og NTNU, EnergiNorge, Nexans Norway og 11 norske e-verk.

Først og fremst vil jeg takke førsteamanuensis Frank Mauseth ved Institutt for Elkraftteknikk (NTNU) og Dr. ing. Sverre Hvidsten ved SINTEF Energi AS. Frank og Sverre har hele tiden vært tilgjengelige og bidratt med god veiledning, samt motiverende ord gjennom hele oppgaven.

Samtidig har forskerne Torbjørn Andersen Ve og Henrik Enoksen ved SINTEF Energi AS, vært gode støttespillere og hjulpet til med diverse praktiske og teoretiske aspekter ved laboratoriearbeidet.

Trondheim, Juni 2016

Magnus Esp Aase

Sammendrag

Kabelskjøter har en lavere forventet levetid i forhold til selve kabelen som ligger på rundt 30-40 år. Det har vært endel havari av kabelskjøter installert på 80-tallet som følge av overopphetning. Denne masteroppgaven er hovedsakelig eksperimentell, og går ut på å undersøke feltstyrende krympestrømper produsert av de samme materialene som en kommersiell tilgjengelig variant produsert på 80-tallet. Bakgrunnen er om det kan benyttes en enkel isolasjonstester (Megger, 5 kV) for å vurdere tilstanden til kabelskjøter.

Den resulterende feltdistribusjonen i skjøten vil være avhengig av påtrykt spenning, frekvens, temperatur og fuktighet. Det vil derfor være av interesse å se på ledningsevne som funksjon av fuktopptak og temperatur. Det er utført vannopptaksmålinger for å karakterisere materialets vannopptak over tid ved konstant temperatur og omgivelsesfuktighet. Det benyttes dielektrisk responsmålinger i tidsdomenet for å beregne konduktiviteten og det benyttes et klimaskap for å undersøke innvirkningen av fuktighet. Målingene er utført for ualdrede og termisk aldrede feltstyrende krympestrømper, hvor aldringen ble utført i et lufttilført varmeskap ved 150 °C.

Resultatene fra vannopptaksmålingene viser at vannopptaket ikke er Fickisk og at opptaket ikke viser noe tegn til metning selv etter 240 dagers opptak ved 90 °C. Fuktopptaket for aldrede krympestrømper ble utført over en kortere tidsperiode, og fuktopptaket går langt tregere enn for ualdret materialet.

De dielektriske responsmålingene viser at ledningsevnen øker med nesten to dekaner for ualdret feltstyrende krympestrømpe ved en økning i temperatur fra 30 til 90 °C. Samt en ytterligere økning på ca. to dekaner i fuktig tilstand ved 90 °C.

Ledningsevnen til den termisk aldrede feltstyrende krympestrømper er over en dekan høyere enn for den ualdrede feltstyrende krympestrømper når de settes opp mot hverandre ved 30 og 90 ° i tørr tilstand. Fuktopptaket har mindre innvirkning på ledningsevnen til den termisk aldrede feltstyrende krympestrømper, men det ble observert en økning med en faktor på 2-3 i fuktig tilstand.

Basert på målingene viser det seg at det vil være vanskelig å skille mellom tørr aldrede, våt aldrede og våt ualdret feltstyrende krympestrømper, da ledningsevnen ved disse situasjonene er svært like.

Abstract

Generally, cable joints have a shorter expected lifetime than the cable, which lie around 30-40 years. There have been many service failures of cable joints installed in the 80's due to overheating. This thesis has mainly been experimental, and aims to examine heat shrinkable stress control tubes. One of the backgrounds of the project is to investigate whether it is possible to use a simple insulation tester (Megger, 5 kV) to assess the condition of such cable joints.

The resulting field distribution in the joint will be dependent on applied voltage, frequency, temperature and humidity. It is therefore of interest to investigate the conductivity as function of moisture absorption and temperature. Water absorption measurements were performed to characterize the material water absorption over time at constant temperature and ambient humidity. To calculate the conductivity, dielectric response measurements were performed in the time domain. The measurements were conducted in a climate chamber in order to examine the influence of humidity. The measurements were performed on unaged and thermally aged heat shrinkable stress control tubes, in which the aging was performed in an air supplied heat cabinet at 150 °C.

The results from the water absorption measurements show that the water uptake is not Fickian and after 240 days of water uptake measurements at 90 °C for unaged stress control tube, the material show no signs of saturation. Water uptake measurements for aged stress control tube was conducted over a shorter period of time, and the results show that the moisture absorption goes far slower than for the unaged material.

The dielectric response measurements show that the conductivity increases by nearly two decades for unaged stress control tube when increasing the temperature from 30 to 90 °C. As well as an additional increase of approximately two decades when introducing moisture at 90 °C.

The conductivity of the thermally aged stress control tube is over one decade higher than for the unaged stress control tube when compared against each other at 30 and 90 °C in dry state. Moisture has less influence on the conductivity for the thermally aged stress control tube, but there was observed an increase by a factor of 2-3 in the wet state.

Based on the measurements, it appears that it will be difficult to distinguish between dry aged, wet aged and wet unaged stress control tubes, as the conductivity in these situations are very similar.

Innholdsfortegnelse

1. Introduksjon	3
1.1 Bakgrunn.....	3
1.2 Hypotese.....	3
2. Teori.....	4
2.1 Krympestrømpen.....	4
2.2 Dielektrisk respons	5
2.3 Feltstyring	8
2.4 Vannopptak.....	13
2.6 Aldring	15
2.7 Strekkfasthet.....	16
3. Metode.....	18
3.1 Prøveobjektet.....	18
3.1.1 Montasje av krympestrømpen	18
3.1.2 Tørrking av prøveobjekt	19
3.2 Termisk aldring.....	20
3.2.1 Aldring av prøveobjektene	20
3.2.2 Karakterisering av aldring.....	20
3.3 Strekkprøving.....	21
3.3.1 Preparasjon strekkprøver	21
3.3.2 Strekkprøving	22
3.4 Vannopptak.....	23
3.4.1 Preparasjon av fuktopptaksprøver	23
3.4.2 Forberedelser for vannopptaksmåling	24
3.4.3 Vannopptaksmåling.....	25
3.4.4 Vannopptaksmåling klimaskap.....	26
3.5 Dielektrisk respons	27
3.5.1 Måleoppsett	27
3.5.2 Måleprosedyrer	28
4. Resultater og diskusjon	30
4.1 Vannopptak.....	30
4.1.1 Fuktopptaksmåling i vannbad ved 90 °C	30
4.1.2 Vannopptaksprøver i fuktig luft	32
4.2 Strekkprøving.....	34
4.3 Dielektrisk respons	35
4.3.1 Prøveobjekt i tørr tilstand ved 30 og 90 °C	35
4.3.2 90 °C, 85 RH, polarisasjon- og depolarisasjonsmålinger	40
5. Konklusjon	46
6. Videre arbeid	47

7. Kilder	48
A. Vedlegg – Dielektrisk respons	i
A1. Polarisasjonsstrøm for OBJ1-4 ved 90 °C og 85 % RH	i
A2. Dielektrisk respons funksjoner for OBJ1-4 ved 30 og 90 °C, tørr tilstand	ix
A3. Dielektrisk responsfunksjoner for OBJ1-4 ved 90 °C og 85 % RH.....	xiii
A4. Tidsutviklingen til de dielektrisk responsfunksjonene ved t = 100.....	xvii
A5. Ledningsevne ved 90 °C og 85 % RH.....	xix
B. Fuktighetsopptakstabeller	xx
B1. Fuktighetsopptak ualdret prøveobjekt ved 90 °C i vann.....	xx
B2. Aldrede og ualdrede vannopptaksprøver i fuktig luft	xxvi
C. Vedlegg – Strekkprøving	xxvii
D. Vedlegg - Beregninger	xxix
D1. Geometrisk kapasitans.....	xxix
D2. Ledningsevne	xxix
D3. Dielektrisk responsfunksjon	xxix

1. Introduksjon

1.1 Bakgrunn

En signifikant andel av de norske mellomspenningskablene er eldre enn sin forventede levetid på 30 år. Kabelskjøter har en lavere forventet levetid enn selve kabelen. Krympestrømper installert på 80-tallet har opplevd mange havarier som følge av overoppheting. På generelt grunnlag kan det utføres tilstandskontroll på kabelskjøter ved hjelp av enten dielektrisk spektroskopi og/eller måling av partielle utladninger. I kabelskjøter og termineringer benyttes feltstyrende materialer for å oppnå ønsket feltdistribusjon for å forhindre lokale feltforsterkninger som kan gi partielle utladninger og eventuelt havari. De dielektriske egenskapene til det feltstyrende materialet vil påvirkes av frekvens og elektrisk felt, i tillegg fuktighet og temperatur. Dermed vil den resulterende feltdistribusjonen være avhengig av frekvens, fukt, temperatur og påtrykt spenning.

Det feltstyrende materialet vil bli karakterisert som funksjon av elektrisk felt, temperatur og fuktighet. Av ulike årsaker kan den feltstyrende krympestrømper i en skjørt aldres raskere som følge av høy temperatur og tilgang på oksygen. På bakgrunn av dette vil den feltstyrende krympestrømper også karakteriseres etter å ha gjennomgått en akselerert termisk aldring. Aldringen karakteriseres ved hjelp av strekkprøving, og innvirkningen av fukt og temperatur vil bli undersøkt nærmere ved å utføre dielektriske responsmålinger på prøveobjekt plassert i klimaskap. I tillegg vil det også utføres fuktopptaksmålinger av ualdret feltstyrende krympestrømpe for å undersøke fuktopptaket og finne metningsgrensen.

1.2 Hypotese

Denne masteroppgaven er hovedsakelig eksperimentell og tar for seg en kommersiell feltstyrende krympestrømpe, som er laget av samme materialet som de som ble brukt på 80-tallet. Innvirkningen av varierende temperatur, elektrisk felt, fuktighet og aldringsgrad, er parametere som vil bli undersøkt for den feltstyrende krympestrømper.

1. Vannopptak
 - i. Den feltstyrende krympestrømper vil gå i metning i løpet av masteroppgaven
 - ii. Fuktopptaket for ualdret og aldret feltstyrende krympestrømpe vil være tilsynelatende identisk ved 90 °C i vann eller i luft ved en relativ luftfuktighet på over 85 %.

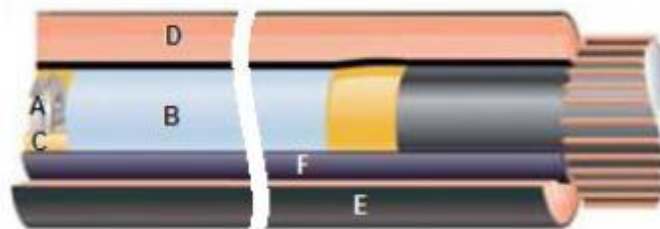
2. Dielektrisk respons
 - i. Ledningsevnen til den feltstyrende krympestrømper vil øke med økende temperatur.
 - ii. Ledningsevnen til den feltstyrende krympestrømper vil øke med økt aldringsgrad
 - iii. Ledningsevnen til den feltstyrende krympestrømper vil øke kontinuerlig som funksjon av økende fuktighetsinnhold

2. Teori

2.1 Krympestrømpen

Krympestrømpen ble oppfunnet på 50-tallet av produsenten Raychem. Feltstyrende krympestrømpe brukes for å oppnå feltutjevning ved skjøting og terminering av kabler, samt forhindre hulrom med en tettsittende passform. Plasseringen til krympestrømpen er markert med bokstaven F i Figur 1 som viser en skisse av oppbygningen til en typisk kabelskjøt. De feltstyrende krympestrømpene er laget av termoplast med fyllpartikler. Det kan brukes en rekke forskjellige termoplaster og fyllpartikler, ut i fra hvilke egenskaper man ønsker produktet skal ha og omgivelsene den må tåle. Typiske termoplaster som brukes er PVC, PTFE, FEP og Viton.

Under tilvirkning av en sylindrerformet krympestrømpe blir materialet kryssbundet i sylindrerform, ofte ved bruk av stråling. Termoplastene får egenskapene til herdeplast ved kryssbinding, det vil si at produktet ikke kan smeltes eller resirkuleres. Deretter blir sylinderen varmet opp til en temperatur høyere en krystalliseringstemperaturen og utvidet, for så å raskt kjøles ned i det utvidete formatet. Kryssbindingen gir materialet en historikk, eller såkalt hukommelse, og gjør at materialet kan lagre store deformasjoner, samtidig som nedkjølingen gjør at materialet forblir utvidet. Hvis materialet gjenoppheves til over krystalliseringstemperaturen vil den trekke seg tilbake til sin opprinnelige form [1].



Figur 1. Skisse av en kabelskjøt sin oppbygning, hvor A: Skjøtehylse, B: Kabelisolasjon, C: Gul mastikk, D: Skjøtisolasjon, E: Ytre halvleder kabelskjøt, F: Feltstyrende krympestrømpe [2].

2.2 Dielektrisk respons

Dielektrisk respons kan enten måles i tidsdomenet ved å påtrykke sprangspenning (DC) eller med hensyn på frekvens ved å påtrykke AC spenning. I denne oppgaven er det brukt dielektrisk respons i tidsdomenet.

Generelt vil molekylene være tilfeldig orientert i materialer bestående av polare molekyler, også kalt dielektrikum. Disse materialene benyttes som elektrisk isolasjon og vil da utsettes for elektriske felt. Når et dielektrikum blir påtrykt et elektrisk felt vil en eller flere polarisasjons mekanismer inntreffe:

Elektronisk polarisasjon

Ved å påtrykke ett elektrisk felt over et atom vil den negative elektronskyen trekkes mot den positive elektroden og den positive kjernen trekkes mot den negative elektroden. Dette medfører at det ellers nøytrale atomet nå har blitt en midlertidig induert dipol, litt negativ på den ene siden og litt positiv på den andre. Effekten anses som momentan og opphører ved å ta bort feltet [3].

Ionisk polarisasjon

En ionisk forbindelse som f.eks. NaCl (Bordsalt), er en bestående av repeterende kjeder av Na⁺ og Cl⁻ ioner. Oppbygningen av krystallstrukturen er helt symmetrisk og genererer derfor ikke noe dipolmoment. Hvis denne strukturen påtrykkes et elektrisk felt, vil feltet trekke de positive og negative ionene i motsatt retning. Dette medfører midlertidige dipoler som følge av forskyvning i gitterstrukturen. Effekten anses som momentan og opphører ved å ta bort feltet [3].

Orienteringspolarisasjon

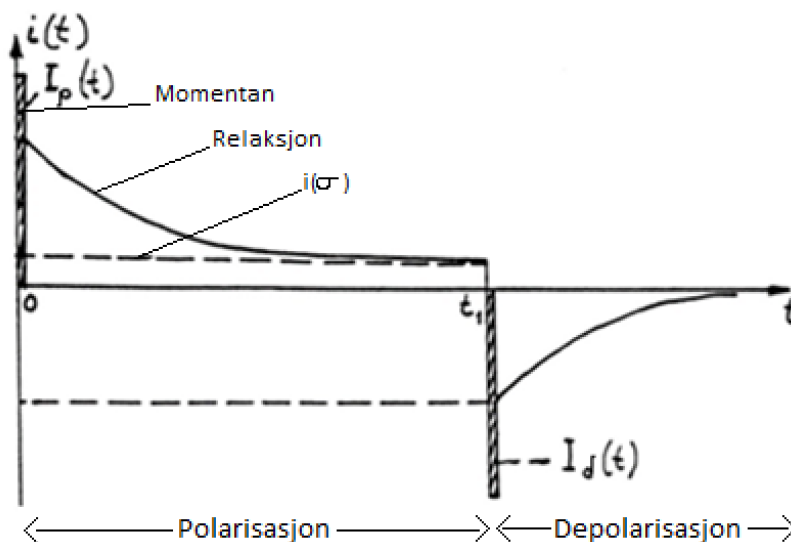
Molekyler som har en usymmetrisk fordeling av elektroner er permanente dipoler, som f.eks. vann. I ett materiale bestående av dipoler som peker i tilfeldige retninger, vil et påtrykt felt føre til at dipolene retter seg inn med feltet. I væsker har molekylene stor frihet til å bevege seg og vil raskt rette seg inn etter feltet, vann klarer å følge felt opp til cirka 2,5 GHz. I faste stoffer har dipolene mindre bevegelsesfrihet som gjør prosessen tidskrevende og kan ta alt fra minutter opptil flere dager å fullføre, og betegnes som relaksjonsmekanisme [3].

Grenseflatepolarisasjon

Virkelige isolasjonsmaterialer trenger ikke å være perfekte på atomnivå og er også sjeldent det. Grenseflatepolarisasjon gjelder for ikke-ledende materialer som for eksempel et dielektrikum. Materialet kan ha forskjellige sammensetninger av atomer, ioner og molekyler. Ved blant annet produksjon kan det oppstå defekter som hulrom og urenheter. Ved påtrykt elektrisk felt, og gitt at isolasjonen inneholder en eventuell urenheter, kan ladning forflytte seg slik at flaten på urenheten som er nærmest den negative elektroden får en netto positiv ladning, og motsatt for flaten nærmest den positive elektroden. Dette gir opphav til et lokalt elektrisk felt. Grenseflatepolarisasjon er ikke en momentan prosess og er dermed klassifisert som en relaksjonsmekanisme [3].

Polarisasjon og depolarisasjon

Ved å påtrykke en sprangspenning over et dielektrikum for så å kortslutte dielektrikumet etter en vis tid, oppnår man den typiske kurven for polarisasjons- og depolarisasjonsstrømmen som vist i Figur 2. Polarisasjonsstrømmen er sammensatt av to mekanismer, hvor den ene er relatert til materialets ledningsevne og den andre til aktivering av polarisasjonsmekanismene innad i materialet. Depolarisasjonsstrømmen representerer relaksjonen av polarisasjonsmekanismene og er gitt av aktivering av polarisasjonsmekanismene under polarisasjonssyklusen. Depolarisasjonsstrømmen oppstår i Figur 2 når dielektrikumet kortsluttes ved tiden $t = t_1$ og fortsetter frem til materialet er fullstendig relaksert og strømmen opphører. Elektronisk og ionisk polarisasjon ansees å opptre og opphøre momentant, og gir kun bidrag akkurat i det spenningen slås på eller av. Det som genererer det eksponentielle avtagende forløpet på kurvene for polarisasjon og depolarisasjon er orienteringspolarisasjon og grenseflate-polarisasjon. Under polarisasjonssyklusen vil relaksjonsmekanismene etter en vis tid ha rettet seg inn med feltet og dermed ikke gi noe strømbidrag. Da er strømmen ved polarisasjonssyklusen kun bestemt av ledningsevnen (σ) til materialet, som illustrert med den øverste stiplede linjen i Figur 2.



Figur 2. Typisk kurve fra måling av polarisasjonsstrøm $i_p(t)$ og depolarisasjonsstrøm $i_d(t)$ henholdsvis i tidsrommet $t - t_1$ og $t_1 - t_2$ [3].

Polarisasjonsstrømmen $i_p(t)$ og depolarisasjonsstrømmen $i_d(t)$ er gitt av henholdsvis ligning (1) og (2) [4].

$$i_p(t) = C_0 U_0 \left[\frac{\sigma}{\epsilon_0} + f(t) \right], \quad 0 < t < t_1 \quad (1)$$

$$i_d(t) = -C_0 U_0 [f(t)], \quad t_1 < t \quad (2)$$

hvor U_0 er påtrykt sprangspenning i ligning (1) og i ligning (2) anses kortslutningen som en påtrykt negativ sprangspenning tilsvarende U_0 . C_0 er den geometriske kapasitansen gitt av målt kapasitans dividert på relativ permittivitet, ϵ_0 er permittiviteten til vakuum, σ er ledningsevnen og $f(t)$ er den dielektriske responsfunksjonen. Depolarisasjonsstrømmen følger generelt et forløp tilsvarende t^{-n} . Responsfunksjonen $f(t)$ er depolarisasjonsstrømmen korrigert mot geometrisk kapasitans og spenningsnivå. Ledningsevnen er en av parameterne som er ønskelig å undersøke og den kan gjøres på flere måter. Ved å kombinere ligning (1) og (2) får man følgende uttrykk for ledningsevnen [4]:

$$\sigma \approx \frac{\epsilon_0}{C_0 U_0} [i_p(t) - |i_d(t)|] \quad (3)$$

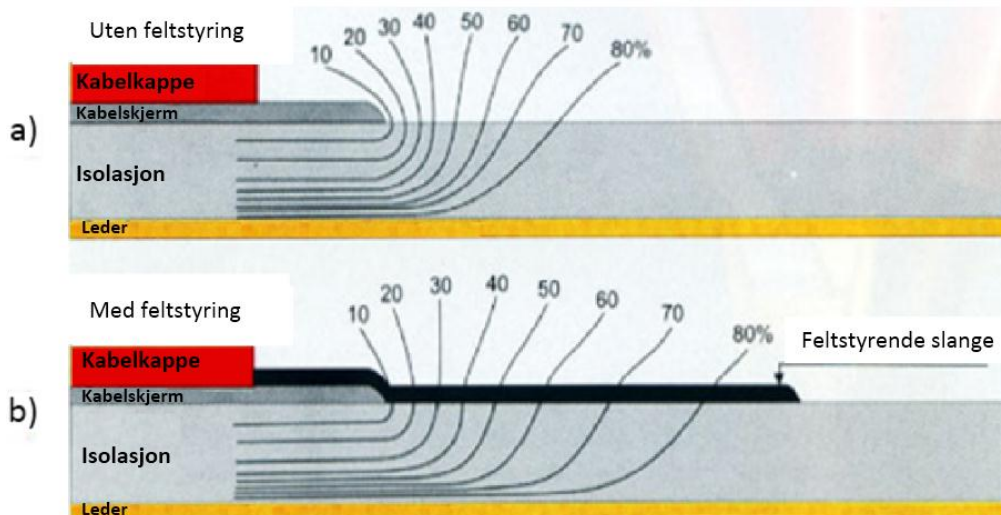
Ledningsevnen beregnes ut ifra differansen mellom polarisasjonsstrømmen og absoluttverdien av depolarisasjonsstrømmen når begge begynner i $t = 0$, hvor den resulterende strømstyrrelsen er bestemt av ledningsevnen til materialet. Eller, som nevnt tidligere, kan man utføre en lang polarisasjonssyklus som resulterer i den samme strømmen når $\lim_{t \rightarrow \infty} f(t) = 0$. Ledningsevnen er som regel sterkt temperaturavhengig og øker med økende temperatur for isolasjon og halvledere [3].

Videre kan den dielektriske responsfunksjonen estimeres fra depolarisasjonsstrømmen hvis polarisasjonssyklusen er tilstrekkelig lang, slik at materialet er fullstendig relaxert før depolarisasjonsstrømmen måles når materialet kortsluttes. Den dielektriske responsfunksjonen beskriver polarisasjonsmekanismene til materialet og kan brukes til å beskrive materialets susceptibilitet i frekvensdomenet. Ligning (4) er gitt av ligning (2), og den viser at depolarisasjonsstrømmen er proporsjonal med responsfunksjonen [5]:

$$f(t) \approx -\frac{i_d(t)}{U_0 C_0} \quad (4)$$

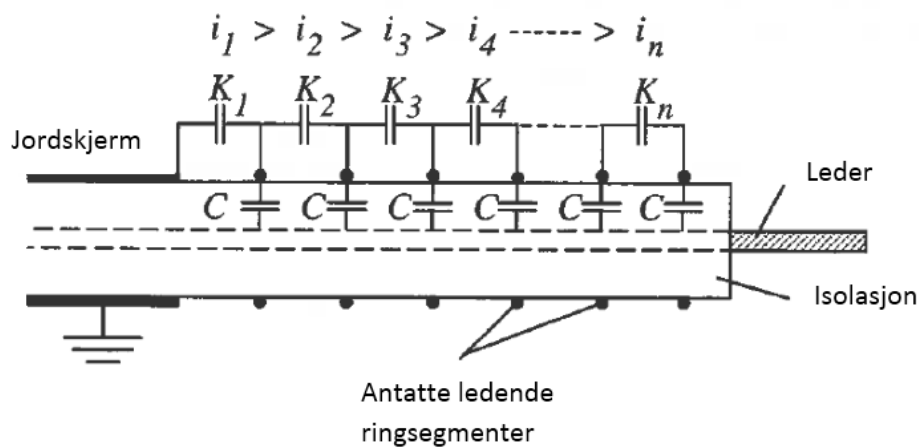
2.3 Feltstyring

Elektrisk feltstyring benyttes for å redusere lokale elektriske feltforsterkninger i elektrisk utstyr som kabler og termineringer. Under normal drift av kabler så ligger hele potensialforskjellen over isolasjonen mellom leder og jordskjerm. Der hvor kableen termineres eller skjøtes, vil det oppstå områder med økt elektrisk stress som følge av feltforsterkning. Ved kabelterminering må jordskjermen fjernes og man får en situasjon som vist i Figur 3a. Med innføring av et feltstyrende belegg ser man i 3b en mye gunstigere situasjon med en jevnere feltfordeling. Uten feltstyring blir potensiallinjene tettere som er ekvivalent med høyere feltstyrke som kan føre til partielle utladninger og eventuelt overslag og havari [6].



Figur 3. Illustrasjon av felt fordeling i en kabel med og uten feltstyring når jordskjermen fjernes [7].

Figur 4 viser en forenklet kretsteknisk ekvivalent for en avmantlet kabel. Kabeloverflaten er delt opp i tenkte ringsegmenter markert med sorte prikker, K_n er kapasitansen mellom ringene og C kapasitansen for isolasjonen mellom ring og leder. Når kableen i Figur 4 spenningsettes vil strømtettheten øke desto nærmere man kommer jordskjermen siden strømmen blir summen av strømmene fra de individuelle ringsegmentene hvor C kapasitansene fører en strøm som går til jord via K kapasitansene [6].

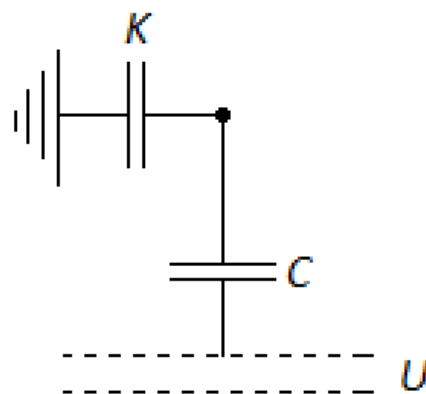


Figur 4. Forenklet kretsteknisk modell for en avmantlet kabel [6].

Ved kretstekniske beregninger vil det gå frem at spenningen over kapasitansene K øker etter hvert som en nærmere seg jordskjermen og feltstyrkens maksimum verdi vil øke med forholdet $\frac{C}{K}$ [6].

For elektrisk feltstyring benyttes det i hovedsak to typer; resistiv og kapasitiv feltstyring [8]:

Refraktiv feltstyring som er en kapasitiv feltstyringsmetode går ut på å øke kapasitansene K i Figur 4. Det brukes materialer med en høy relativ permittivitet i området 20-1000 og dette gjør at spenningsfordelingen blir frekvensuavhengig. Høypermittivitets fyllpartikler som benyttes er eksempelvis titandioxid (TiO_2) og bariumtitanat (B_2TiO_3). Et utsnitt av Figur 4 er presentert i Figur 5, når konduktiviteten er så liten at den er neglisjerbar, kan spenningsdelingen over kondensatorene uttrykkes med ligning (5) [6].

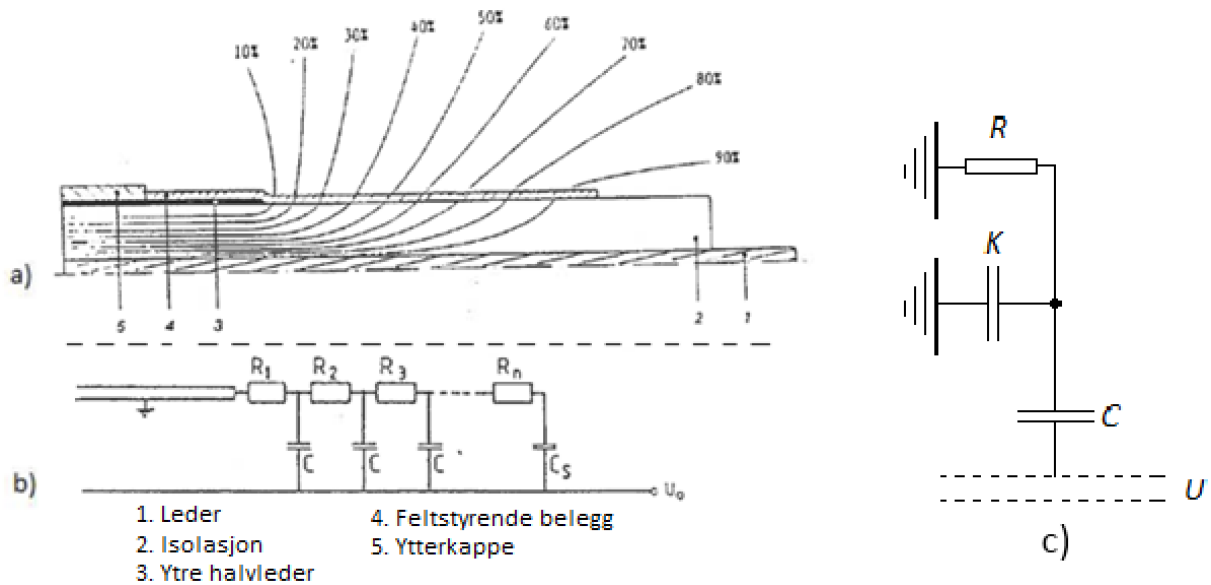


Figur 5. Utsnitt av Figur 4 med C og K kapasitansen koblet mellom jordskjerm og leder.

Spenningsfordelingens frekvensuavhengighet kommer frem i ligning (5) ved at uttrykket blir redusert til en konstant, fordi man blir kvitt alle $j\omega$ termene.

$$U_k = U \times \frac{\frac{1}{j\omega K}}{\frac{1}{j\omega K} + \frac{1}{j\omega C}} = U \times \frac{C}{C + K} \quad (5)$$

For *resistiv feltstyring* benyttes det et feltstyrende belegg som er svakt ledende. Vanlige fyllpartikler er eksempelvis silisiumkarbid (SiC), sinkoksid (ZnO) og karbon (C). Dermed dannes det et svakt ledende belegg slik at kapasitansene K i Figur 4 blir parallellkoblet av resistanser som har en lavere impedans enn kapasitansene. Situasjonen vil da bli noe lignende som vist med ekvipotensiallinjer i Figur 6a, og kretsteknisk i Figur 6b og inklusive K kapasitansen i Figur 6c [6, 9].

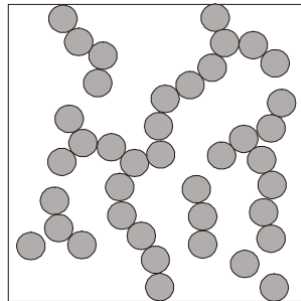


Figur 6. Snitt av en endeavslutning med resistiv feltstyrende belegg hvor a) viser antydte ekvipotensiallinjer, b) forenklet kretsteknisk ekvivalent og c) viser et utsnitt av situasjonen i b) men inkluderer K kapasitansen [6].

Parallelle koblingen i Figur 6c gjør at spenningene i knutepunktene vil være faseforskjøvet i forhold til hverandre, samt at spenningsfordelingen også vil være frekvensavhengig som vist i ligning (6) [6].

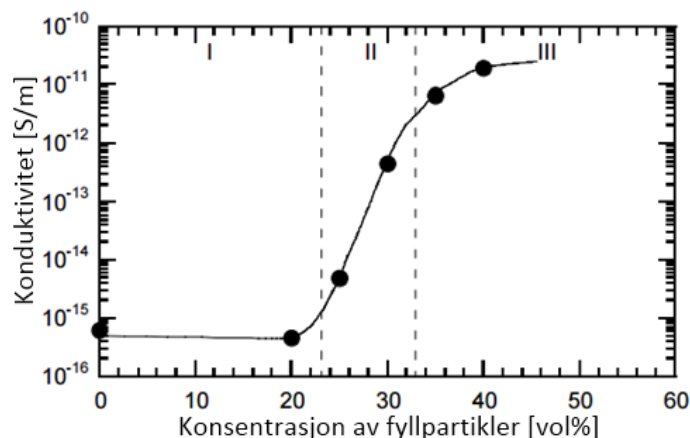
$$U_R = U_K = U \times \frac{\left(\frac{1}{R} - j\omega K\right)(j\omega C)}{\left(\frac{1}{R} - j\omega K\right)(j\omega C) + \left(\frac{1}{R^2} + (\omega K)^2\right)} \quad (6)$$

Perkolasjon er et fenomen som må opp til betraktning ved design av feltstyrende komposittmaterialer. Når et elektrisk isolerende materialet tilsettes partikler med høy ledningsevne, vil perkolasjonsterskelen bli oppnådd når det er tilsatt nok partikler til å danne en kontinuerlig kjede gjennom materialet, som illustrert i Figur 7 [10].



Figur 7. Illustrasjon av todimensjonal perkolasjon i et komposittmateriale med sirkulære fyllpartikler [10].

Ved denne terskelen skjer det store endringer i materialets ledningsevne og materialet vil gå fra en isolerende til en delvis ledende tilstand. Perkolasjonsterskelen vises innenfor det stiplede området i Figur 8 [10].



Figur 8. Ledningsevne som funksjon av prosentvis konsentrasjon av fyllpartikler for EPDM dopet med SiC. En hypotetisk kurve er tegnet mellom målepunktene for å illustrere ett-steps-perkolasjon målt ved 1 kV/mm [10].

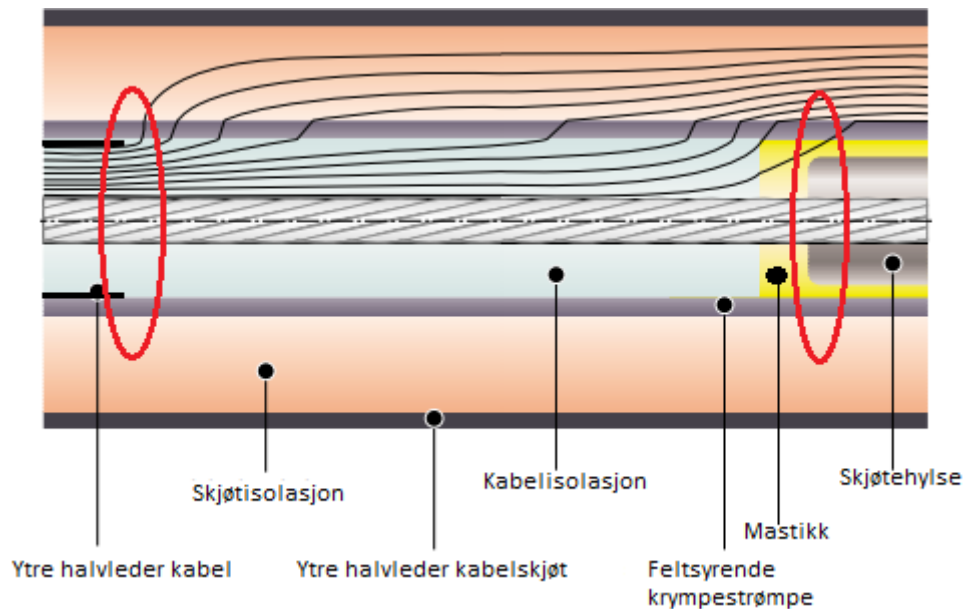
Fra grafen kommer det frem at konsentrasjoner under 20 % ikke vil øke ledningsevnen i noen grad og at ledningsevnen øker minimalt for konsentrasjoner over 40 %. Ut ifra hvilken ledningsevne man ønsker å oppnå, må det uansett med denne molekylsammensetningen dopes med en konsentrasjon mellom 25-35 % for å få mest konduktivitet per molekyl.

Forløpet i Figur 8 viser en ett-steps-perkolasjon for denne materialsammensetningen. Det eksistere også flersteps-perkolasjon, det vil si at kurven i Figur 8 ville hatt flere perkolasjonsterskelområder. Dette kan oppstå som følge av at isolasjonsmaterialet har flere faser, interne grenseflater med økt ledningsevne og som følge av at forskjellige varianter av kontaktflateforbindelser mellom partikler [10].

Ulineær feltstyring kan oppnås på flere måter, ett par eksempler er: Materialet kan dopes med partikler som har individuelle feltavhengige egenskaper og ulineær feltavhengighet vil fremkomme ved perkolasjonsterskelen. Eller det kan benyttes partikler med interne lineære feltavhengige egenskaper og høy ledningsevne, men da må konsentrasjonen være nær men ikke større eller lik

perkolasjonsterskelen. Ett eksempel på en slik partikkel er karbon (C). Med u-lineær feltstyring får grenseflatene i isolasjonslagene en glattere overgang og særlig der feltforsterkningen er størst vil u-lineæriteten bidra til å «forskyve» feltet utover. Det er ønskelig med u-lineær feltstyring slik at den elektriske påkjenningen fordeles jevnes mulig utover.

I Figur 9 vises en halvdel av en kabelskjøt hvor det er brukt feltstyrende slange og mastikk. De røde ringene indikerer områdene der hvor de største elektriske påkjenningene normalt vil opptre og i disse områdene er det særlig viktig med feltstyring og å forhindre hulrom [3]. En kabelskjøt vil i de fleste tilfeller ikke oppnå en fabrikkny tilstand relativt til en uskjøtet kabellengde, da det også er ønskelig å redusere kostnader og skjøtetid ved reparasjon av kabler. Kordelene vil ikke bli sveiset og det må da benyttes en skjøtehylse som vil utvide det metalliske området, som igjen genererer et område med feltforsterkning i kanten av hylsen (indikert med rød ring i Figur 9). Kabelen må avmantles ved skjøting og jordskjermen fjernes i området før ytre halvleder og vi får en lignende situasjon som tidligere forklart ved hjelp av Figur 3.



Figur 9. Viser feltdistribusjonen i en halvdel av en kabelskjøt, med mastikk (i gult) og feltstyrende krympestrømpe, røde ringe indikerer områder utsatt for størst elektrisk påkjenning [11].

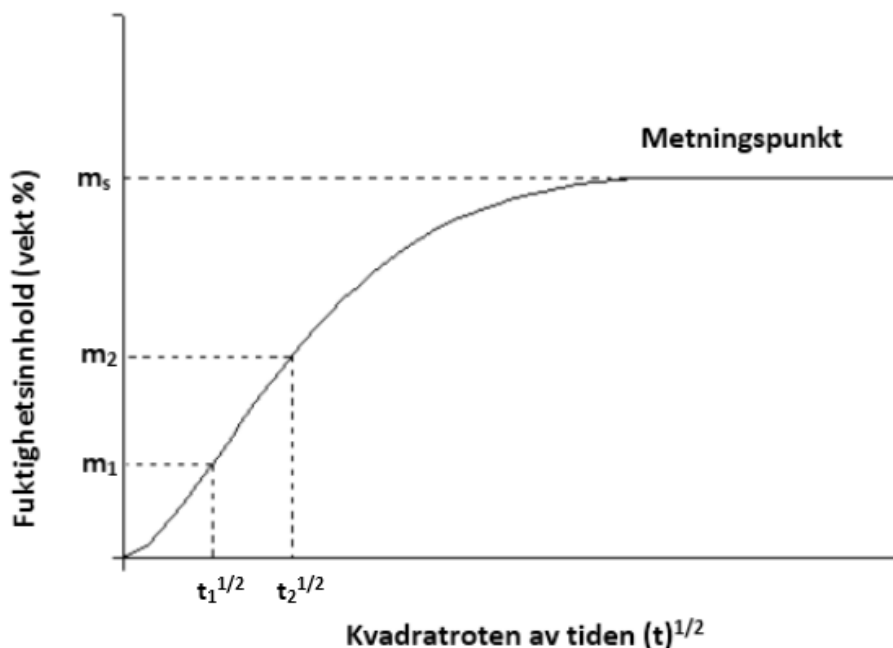
Det gule laget rundt skjøtehylsen i Figur 9 er mastikk og er ofte brukt som fyllmasse rundt skjøtehylsen ved skjøting av kabler. Mastikken har høy permittivitet og er ment for å fylle hulrom og hindre evt. elektriske utladninger. I praksis brukes det ofte feltstyrende krympestrømpe med en blanding av resistiv og refraktiv feltstyring, slik at feltfordelingen er god ved variasjon i både spenning og frekvens.

2.4 Vannopptak

For at et materialet skal kunne ta opp vann må det først og fremst være plass til vannet på molekylært nivå. Metaller er vanntette fordi molekylene er så tettpakket i en krystallstruktur slik at vannmolekylet er for stort til å trenge inn i strukturen. Den feltstyrende slangen som er brukt i denne oppgaven er en kryssbundet polymer som inneholder fyllpartikler for å oppnå ønskede egenskaper. Termoplastiske polymerer kan ha krystallinske områder, men mesteparten av volumet er som regel amorft. Sammen med de termiske vibrasjonen fører dette til at det er fritt volum i mellom polymerkjedene inne i materialet. Består det frie volumet av sammensatte kanaler og er stort nok, vil materialet kunne absorbere vann og vannmolekylene kan diffundere videre inn i materialet [12]. Det frie volumet i krympestrømpen vil variere med hensyn på krympegraden. Det er vist tidligere at vannopptaket går raskere ved u-krympede og delvis krympede strømpes, og med økende temperatur [13]. For å få informasjon om materialets vannopptakskurve og metningspunkt, må det utføres målinger tilpasset empiriske ligninger. En måte å gjøre dette på er masseopptaks måling som går ut på å eksponere prøver for konstante omgivelser med tanke på fuktighet og temperatur, samtidig som vektendringen måles med hensyn på tid. Masseendringen som funksjon av tiden beregnes ut ifra ligning (7), hvor $m(t)$ er veid vekt ved tiden t , $m(0)$ er initialvekt (som regel tørrvekt) og Δm er vektendringen.

$$\Delta m = \frac{m(t) - m(0)}{m(0)} \quad (7)$$

Diffusjonskurver kan så lages ved å plote vektendring med hensyn på roten av tiden delt på tykkelsen av materialet. Diffusjonskurven kan da kurvetilpasses mot kjente diffusjonskurver som for eksempel Fickisk diffusjon (type 1), som vist i Figur 10. Fickisk diffusjon (type 1) kjennetegnes ved at prøven går i metning relativt raskt etter ett lineært område på diffusjonskurven som varer frem til cirka 50 % av metningen når vektendringen plottes mot roten av tiden [14].



Figur 10 Fickisk diffusjonskurve, vektendring frem til metning (M_s) plottet mot roten av tiden, lineært området innenfor t_1 og t_2 [15].

Det lineære området kan brukes til å bestemme diffusjonskoeffisienten D med ligning (8), der l er tykkelsen, m_s er fuktighetsinnholdet ved metning, m_1 er fuktighetsopptaket ved tiden t_1 , m_2 er fuktighetsopptaket ved tiden t_2 . Diffusjonskoeffisienten er en proporsjonalitetskonstant relatert til diffusjonshastigheten hvor en større verdi gir raskere diffusjon [14]:

$$D = \frac{\pi}{16} \left(\frac{l(m_2 - m_1)}{m_s(\sqrt{t_2} - \sqrt{t_1})} \right)^2 \quad (8)$$

Når diffusjonskoeffisienten og metningskonsentrasjonen er kjent, kan ligning (9) brukes til å estimere fuktighetsinnholdet med de samme omgivelses-forholdene for materialet over tid. Hvor $m(t)$ er fuktighetsinnholdet ved tiden t , M_i er det initielle fuktighetsinnholdet og t er tiden. Hvis D er funnet fra en prøve som var utsatt for en tosidig eksponering og man trenger å regne ut fuktighetsinnholdet for det samme materialet som bare er utsatt for ensidig eksponering med de samme omgivelsene, kan ligning (9) benyttes ved å sette inn $(2l)^2$ istedenfor l^2 [14].

$$\frac{m(t) - m_i}{m_s - m_i} = 1 - \exp\left[-7,7 \left(\frac{D \times t}{l^2}\right)^{0,75}\right] \quad (9)$$

2.6 Aldring

Når et materialet gjennomgår en irreversible forandring som følge av interaksjon med omgivelsene betegnes det som aldring. Akselerert aldring kan forekomme av f.eks. økende temperatur og eksponering for UV-stråling, men det avhenger av hvordan type materialet og hvilke omgivelser det er snakk om. Aldring kan ofte gjenkjennes ved misfarging, fysiske deformasjoner og endring i de mekaniske egenskapene. Karakteristisk for aldring av plastmaterialer er at de blir misfarget og sprøere og de elektriske egenskapene endres også.

En kabelskjøt er normalt godt kapslet og ligger under bakken. Derfor vil ikke stråling normalt sett bidra til aldringen, men varmeutvikling og tilgang til kjemikalier vil være de dominerende faktorene. Oksygen vil forekomme i skjøten som følge av skjøteprosessen og over tid vil det sannsynligvis trenge inn væske og gass (hovedsakelig vann) da det er en kombinasjon av krevende og kostbart å konstruere en 100 % tett skjøt. Samtidig som skjøtens beskyttelseslag også vil kunne aldres, skades og feilmonteres og forårsake inntrenging av uønskede stoffer i form av lekkasje.

Oksidasjon

Ved en oksidasjon er ikke nødvendigvis oksygen en del av reaksjonsligningen da andre kjemiske forbindelser kan gi samme utfall. Men siden oksygen er ett veldig reaktivt grunnstoff og utgjør ca. 20,8 % av jordas atmosfære, vil oksygen i svært mange tilfeller være oksidasjonsmiddelet.

Polymer materialer kan aldres fortløpende ved at det oppstår en kjedereaksjon som følge av dannelsen av frie radikaler. Frie radikaler er molekyler som har ett uparet valenselektron og er her betegnet som $R\cdot$. Disse dannes ved blant annet termisk aldring, stråling og kjemiske reaksjoner. For å forklare prosessen tas det utgangspunkt i interaksjonen mellom oksygen (O_2) og polyetylen ($(C_2H_4)_nH_2$) som fri radikal på grunn av ett manglende hydrogen atom ($(C_2H_4)_nH$) [16].

Startfasen:



Forplantning:



Terminering:

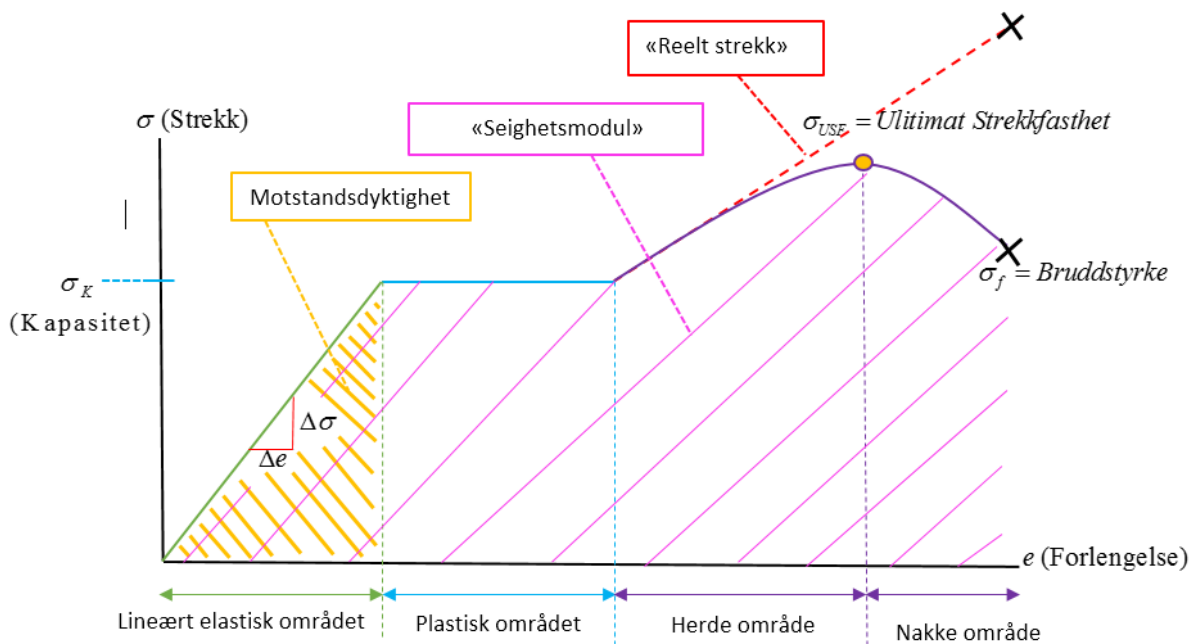


Startfasen for dannelsen av en radikal er i dette tilfellet en polyetylenpolymer som mister ett hydrogenatom som følge av energitilførsel i form av stråling, varme eller lys [16]. Forplantningen viser hvordan en kjedereaksjon kan oppstå. Startradikalen reagerer med et oksygenmolekyl og danner en ny radikal $ROO\cdot$. Den nye radikalen ($ROO\cdot$) reagerer så med en annen polyetylenpolymer og danner $ROOH$ og en ny radikal, som kan gjennomgå den samme prosessen og en kjedereaksjon kan være i gang. Kjedereaksjonen kan termineres ved at to radikaler reagerer med hverandre og danner et nytt molekyl, eller ved at radikalen(e) inngår i dannelsen av inerte produkter.

2.7 Strekkfasthet

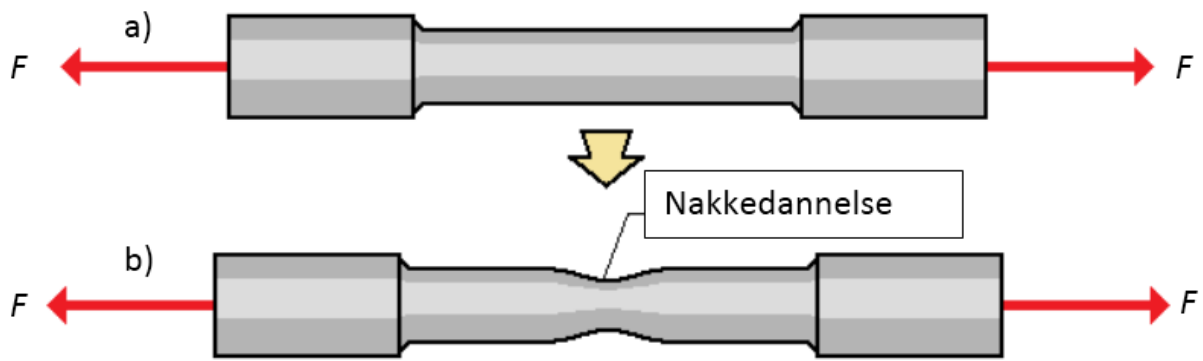
Strekkfasthet er betegnelsen på en materialegenskap som har med materialets respons ved påtrykt aksielt strekk. For å karakterisere materialet, utføres det strekkprøving hvor materialet er preparert til en kjent geometri og forlengelse måles som funksjon av strekkraften. Resultatet fra strekkprøvingen kan representeres grafisk og Figur 11 viser et eksempel på dette, hvor:

- Y-aksen viser påtrykt strekkraft relativt til arealet til strekkprøven og har benevnningen $[N / m^2]$
- X-aksen representerer strekkprøvens endring i lengde og er dimensjonsløs $[\frac{\Delta L}{L}]$



Figur 11: «Stress-Strain curve», y-aksen representerer strekkraften («stress») $[N/m^2]$, der strekkraften er relativt til arealet til strekkprøven og x-aksen viser lengdeendringen («strain/forlengelse») til strekkprøven [1].

Startfasen av grafen er lineære og kalles det lineære elastiske området, her er det proporsjonalitet mellom trykk og forlengelse. Det vil si at hvis trykket opphører innenfor dette området, vil materialet være i stand til å trekke seg tilbake til original størrelse uten permanent deformasjon, også kalt plastisk deformasjon. Alle materialer har et lineært elastisk område, men størrelsesordenen av motstandsdyktigheten varierer. Påtrykkes materialet en strekkraft som overstiger den lineære delen av kurven, beveger vi oss inn i det plastiske området og materialet vil nå ha gjennomgått en uniform plastisk deformasjon. Det neste området på grafen er typisk for metaller og har navnet herde området, metallens hardhet øker som følge av dannelsen av flere deformasjoner. Strekkprøvens forlengelse er uniform innad i materialet frem til σ_{USE} , hvor deformasjonen ikke lenger vil være uniform og det dannes en tydelig innsnevring på prøven som vist i Figur 12, innsnevringen har navnet nakke. Når nakken formeres vil all videre deformasjon foregå i nakkeområdet frem til σ_f hvor strekkprøven ryker. Grafen i Figur 11 tar utgangspunkt i arealet strekkprøven har ved start, det vil si at grafen vil stige ytterligere etter σ_{USE} , hvis det tas hensyn til arealforminskingen ved nakkedannelsen. Dette illustreres med den røde stiplede linjen i Figur 11 som representerer «reelt strekk».



Figur 12: Nakkedannelse hvor a) viser strekkprøve før nakkedannelse og b) viser strekkprøve med nakkedannelse [17].

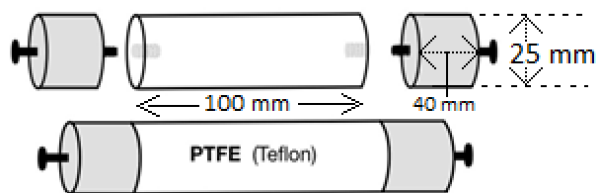
Strekkprøving blir brukt i denne oppgaven for å karakterisere aldringen til den feltstyrende krympestrømpen. For kryssbundet polyetylen anses forlengelse før brudd på 50 % som slutten av levetiden [18].

3. Metode

Den feltstyrende krympestrømpen er prøveobjektet og det utføres dielektrisk responsmålinger, fuktopptaksmålinger og strekkprøving for friske og termisk aldrede prøveobjekt. Dielektrisk responsmålingene utføres i tidsdomenet med påtrykt sprangspenning ved hjelp av en Megger. Dielektrisk responsmåling blir utført på prøveobjekt hvor både temperatur og fuktighetsinnhold blir regulert og variert. For å ha kontroll på fuktopptaket utføres det individuelle fuktopptaksmålinger fra samme materialet og for å karakterisere aldringen utføres det strekkprøving.

3.1 Prøveobjektet

Det ble laget mange sylindere for montasje av krympestrømpene. De monterte krympestrømpene brukes til forskjellige formål som dielektrisk respons, fuktopptak og strekkprøving. Disse forsøkene blir utført på aldrede og ualdrede prøveobjekt. For å kunne bruke sylindere til dielektrisk responsmåling av prøveobjektet, består sylindere av metallektroder på hver side av et elektrisk isolerende materiale. Sylindere har en diameter på 25 mm og denne dimensjonen er innenfor det anbefalte krympeområdet som krympestrømpen er designet for. Midtdelen av sylindere har en lengde på 100 mm og er laget av det elektrisk isolerende materialet Polytetrafluoreten (PTFE / Teflon). PTFE brukes siden det har en veldig lav konduktivitet og vil dermed ikke påvirke målingene i form av strømbidrag ved måling av dielektrisk respons. Sylinderkonfigurasjonen med elektrodene og isolasjonsmediet i midten vil videre bli referert til som PTFE-staven, og vises i Figur 13.



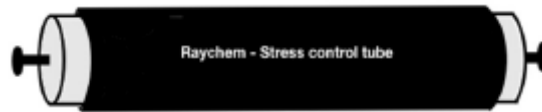
Figur 13. Skisse av PTFE-staven, hvor midtdelen av PTFE og metall elektrodene på sidene har en diameter på 25 mm, og en lengde på henholdsvis 100 mm og 40 mm [13].

3.1.1 Montasje av krympestrømpen

For å hindre at støv, partikler og andre urenheter skal feste seg og forstyrre målingene, blir PTFE-staven og krympestrømpen rengjort med isopropanol og lofritt papir. Samtidig som det alltid benyttes rene plastikkhansker når det er nødvendig å ha fysisk kontakt med prøveobjektet.

Før krympingen utføres så spennes PTFE-staven fast ved enden av elektroden i en skrustikke og elektroden isoleres på forhånd for beskyttelse mot skadelig mekanisk påkjenning. Dette er hensiktsmessig da det er lettere å utføre en god og jevn krymp når prøveobjektet står i ro, samt at PTFE-staven og krympestrømpen vil oppnå en høy temperatur under krympingen.

Krympestrømpen legges slik at den ligger godt innenfor elektrodeområdet på begge sider, for å sikre god elektrisk kontakt i tilfelle den aktuelle sylindere skal benyttes til dielektrisk responsmålinger. For å utføre krympingen ble det brukt en luftvarmepistol som genererer en luftstrøm med en temperatur på opp mot 630 °C. Krympingen begynner på midten av strømpen med sirkulerende bevegelser rundt hele omkretsen og utover for en side om gangen. Det utføres slik for å unngå at krympestrømpen blir overopphetet og får permanente varmeskader, samtidig som strømpen blir veldig tettsittende og forhindrer hulrom. Ved en jevn krymp har den felt styrende krympestrømpen en tykkelse på ca. 2 mm. En tegning av PTFE-staven med krympestrømpe vises i Figur 14 og blir videre referert til som prøveobjekt.



Figur 14. PTFE-staven med krympestrømpe [13].

3.1.2 Tørking av prøveobjekt

Etter at krympestrømpene er montert blir prøveobjektene tørket i vakuumskap med en temperatur på 70 °C i 3 døgn, for så å senke temperaturen til 25 °C i ett døgn. Dette gjøres før prøveobjektene tas ut for videre bearbeiding i form av termisk aldring, for å lage vannopptaksprøver, strekkprøver eller for å utføre dielektrisk responsmålinger. For prøveobjekt som skal termisk aldres utføres tørkeprosessen før og etter aldringsprosessen. Dette gjøres for at prøveobjektene skal bli tørre og ha samme utgangspunkt før målinger, som igjen gir et sammenlignbart resultat.

3.2 Termisk aldring

Ut ifra materialsammensetningen vil kabler ha forskjellige spesifikasjoner, der i blant PEX isolerte kabler har en maksimal driftstemperatur på 90 °C, og det er ikke usannsynlig uansett kabeltype at temperaturen i en kabelskjøt som følge av dårlig kontakt kan nå opp til og overstige 150°C [3].

Det skal undersøkes hvordan aldring påvirker materialets dielektriske respons, og for å fremskynde aldringsprosessen benyttes et varmeskap med justerbar lufttilførsel. Varmeskapet holder en temperatur på 150°C, ved denne temperaturen går aldringen raskt, og ved riktig forberedelse, uten å ødelegge materialet. For å unngå at materialet revner som følge av kaskadeeffekt fra riftdannelse i kantene av krympestrømpen under aldringen, må endene på krympestrømpen isoleres for å bistå med mekanisk stabilitet og beskytte kantene mot aldring. Ved isoleringen av kantene for prøveobjektene som skal brukes til dielektrisk respons, så må ikke tildekningen dekke for mye av krympestrømpen slik at strømpen som har elektrisk kontakt med elektrodeområdet også aldres. For strekkprøvene og vannopptaksprøvene er ikke dette et problem da arealet i mellom kantisolasjonen uansett er stort nok for sitt formål. Tildekningsmaterialet må tåle påkjenningene fra varmeskapet og det ble i dette tilfellet benyttet en tynnvegget VITON krympeslange (fluor basert polymer) med en spesifisert minimum krympetemperatur på over 300 °C.

3.2.1 Aldring av prøveobjektene

Det aldres åtte prøveobjekt, hvor to skal benyttes til dielektrisk respons, tre til fuktopptaksmåling og tre til strekkprøving. Prøveobjektene monteres og prepareres slik som angitt i 3.1, 3.1.1 og 3.1.2. Deretter isoleres kantene på prøveobjektene som forklart i 3.2 og alle prøveobjektene plasseres i varmeskapet samtidig for at prøveobjektene skal aldres likt. Når ønsket aldring er oppnådd plasseres de allerede prøveobjektene for dielektrisk respons og fuktopptak tilbake i vakuumskapet for tørking som forklart i 3.1.2. Dette gjøres fordi prøveobjektene har tatt opp fukt under aldringen, samt at tørrvekten for vannopptaksprøvene skal måles og de dielektrisk responsmålingene skal i første omgang foregå i tørr tilstand.

3.2.2 Karakterisering av aldring

Aldring er relativt og må ses i sammenheng med ett spesifisert nullpunkt. En metode for å anslå aldringen til et materialet er å sammenligne ett eller flere av materialets nåværende egenskaper med dens egenskaper ved det spesifiserte nullpunktet. Det vil da ofte være gunstig å sette dette nullpunktet til materialets fabrikknye egenskaper, eller til materialets bearbeidede tilstand hvis materialet må bearbeides for å oppnå sin hensikt.

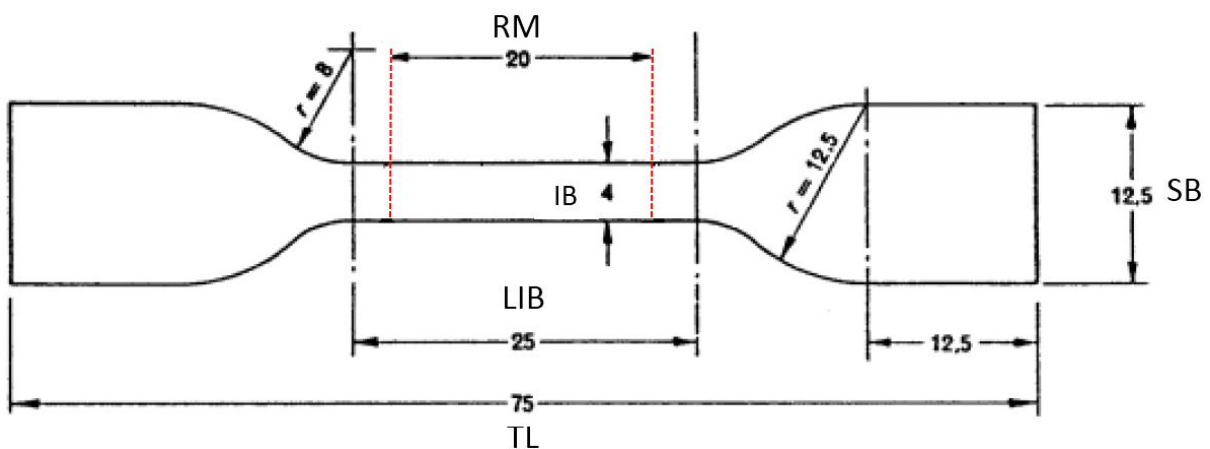
Noen egenskaper er bedre egnet å sammenligne ut ifra hvordan type materialet som skal undersøkes. Plast materialer har en tendens til å bli sprøere ved termisk aldring ved at polymerkjedene forkortes og materialets elastisitet reduseres, og dette kan undersøkes ved strekkprøving. Ved strekkprøving resulterer dette i at et aldret plastmaterialet vil ha en redusert maksimal forlengelse før brudd, og dette gir en indikasjon på graden av aldringen. Maksimal forlengelse før brudd ble bestemt til å være målestokk for hvor langt aldringen var kommet, og målet var å minimum halvere denne for de allerede prøveobjektene sammenlignet med de ualdrede. Det er vanskelig å definere aldringen mot gjenværende levetid, prosent aldret o.l., men [18] angir 50 % forlengelse før brudd som enden av levetiden for kryssbundet polyetylen. Det var på forhånd usikkert hvor lang tid som måtte til for å oppnå ønsket aldring. Men av tidsmessige årsaker ble det bestemt at prøveobjektene kunne aldres i maksimalt 2 uker. Den første strekkprøvingen ble utført etter 1 ukes aldring, og det ble påvist tilstrekkelig aldring.

3.3 Strekkprøving

Strekkprøving brukes til å karakterisere noen av materialets mekaniske egenskaper. I denne oppgaven er strekkprøving benyttet til å karakterisere aldringen til den feltstyrende krypestrømpen som har gjennomgått akselerert termisk aldring, ved å sammenligne resultatet fra strekkprøvingen for friske og aldrede prøveobjekt.

3.3.1 Preparasjon strekkprøver

Krypestrømpen skjæres av langs med sylindere, slik at den kan brettes ut til et rektangel. Deretter benyttes en stansesmaskin med et «hundebein» formet knivblad (som vist i Figur 15) til å stanse ut ønsket antall prøver. Sylindere størrelse gir i dette tilfellet opphav til seks hundebein, standarden IEC 60811-1-1 pålegger et minimum av fem strekkprøver fra materialet som skal strekkprøves. Den samme standarden angir standardiserte mål for hundebeinets utforming og disse vises i Figur 15 [19].



Figur 15. Hundebein, standard formen på de utstansede prøvene som er klare for strekkprøving fra IEC 60811-1-1. Hvor: TL = Total lengde (75 mm), LIB = Lengde innsnevret bredde (25 mm), SB = Stor bredde (12,5 mm), IB = Innsnevret bredde (4 mm) og RM = Referanse merker (20 mm). De røde stiplede linjene indikere plassering av reflektorteip for måling av lengdeendring ved hjelp av en ekstern lasermåler [19].

Alle dimensjonene til hundebeinet er konstante med unntak av tykkelsen. Tykkelsen kan variere av produksjons- og/eller håndverksmessige årsaker, i praksis vil det uansett være svært vanskelig å utføre en perfekt krymp som resulterer i en konstant tykkelse rundt hele sylindere.

Det innsnevrede området er det som skal strekkes og tykkelsen til dette området måles på tre steder med et digitalt skyvelære og den smaleste verdien blir grunnlaget for arealet til prøven. Dette gjøres på grunn av at materialenes strekkfasthet er direkte relatert til tykkelsen, hvor et smalere objekt vil tåle mindre enn et tilsvarende tykkere objekt ved samme påkjenning (strek).

For å måle lengdeendringen under strekkprøvingen brukes det en ekstern lasermåler. For at lasermåleren skal registrere forlengelsen monteres det reflektorer på hundebeinet. Det klippes til to tynne reflektorer fra en reflektorteip som monteres på det innsnevrede området med en avstand på 20 mm. Avstanden på 20 mm brukes da det er spesifisert i IEC 60811-1-1 at strekkprøven skal ha referansemarkering med ett mellomrom på 20 mm, og at bruddet under strekkprøvingen skal forekomme innenfor dette området. Avvik fra den spesifiserte avstanden ved montering av reflektorene vil bli kompensert av den eksterne lasermåleren.

3.3.2 Strekkprøving

Når hundebeinets tykkelse er målt og reflektorene er montert, er prøven klar for strekking. Prøven plasseres i strekkbenken hvor de store breddene av hundebenet kiles fast slik at prøven ikke sklir ut av posisjon ved påtrykt strekk og at det er prøveområdet på hundebenet som utsettes for strekket. Den eksterne lasermåleren stilles inn slik at laserstrålen er sentrert på midten av hundebenet. Ut ifra hvor nøyaktig reflektorene er montert, vil lasermåleren vise en prosentandel som indikerer avstanden i mellom reflektorene relativt til maksimal målelengde. Maksimal målelengde er satt til 500 mm og lasermåleren vil da vise 4 % om reflektorene er plassert med et mellomrom på nøyaktig 20 mm.

Data programmet Nexygen benyttes til å loggføre dataene under strekkprøvingen. I programmet velges størrelsen til hundebenet fra en liste med spesifisert størrelser i henhold til IEC 60811-1-1 slik at det bare er den målte tykkelsen som er varierende ut ifra geometrien og denne må spesifiseres i programmet. Strekkhastigheten må også spesifiseres, men den finnes også i IEC 60811-1-1 og er oppgitt til $25 \frac{mm}{minutt}$. Prøven er nå klar for strekkprøving, trykk på start, vent til prøven ryker og konstanter at bruddet foregikk imellom reflektorene, og utfør minimum fem strekkprøver fra samme prøveparti.

3.4 Vannopptak

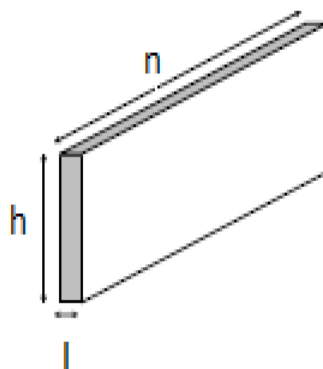
For å kunne bestemme vanninnholdet i krympestrømpene uten å direkte måle vektendringen til prøveobjektet, utføres det en kontinuerlig vannopptaksmåling på vannopptaksprøver av tilsvarende krympestrømpe under identiske omgivelser med tanke på temperatur og fuktighet.

Vekten som brukes til å måle vektendringen til vannopptaksprøvene har for lite målekammer og målekapasitet for å direkte måle vektendringen til prøveobjektene. I tillegg måtte prøveobjektene vektendring blitt målt inne i klimaskapet for å ha kontroll på klimaet i klimaskapet og fuktighetsopptaket til prøveobjektene. Ved å åpne klimaskapet vil temperaturen og luftfuktigheten i målekammeret synke drastisk, I tillegg ville usikkerheten for fuktopptaket til prøveobjektene økt som følge av mulig utdiffundering av vann.

3.4.1 Preparasjon av fuktopptaksprøver

Prøveobjektet som brukes til fuktopptaksmålingene tørkes ved samme prosedyre som beskrevet i 3.1.2, først etter at fuktopptaksprøvene er laget fra prøveobjektet. Etter at krympestrømpen er montert har den og sylinderen høy temperatur, og trenger tid på å kjøle seg ned før den flyttes for videre bearbeiding. Etter tilstrekkelig nedkjøling fjernes krympestrømpen ved bruk av kniv og er da klar til å klippes opp i mindre rektangulære biter.

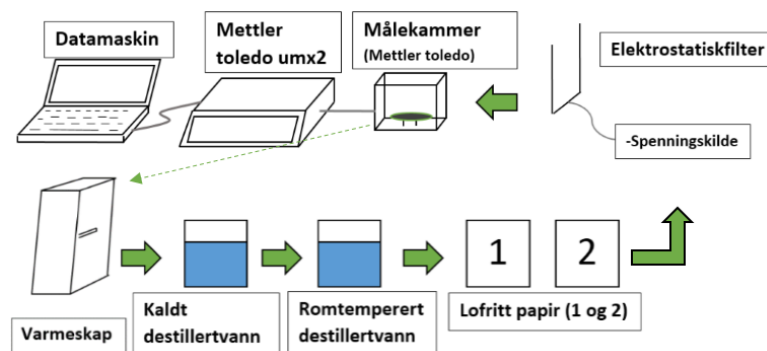
Den avkappede sylindriske krympestrømpen kan brettes ut slik at den representerer et rektangel. Strømpen klippes så opp i et ønsket antall rektangulære biter som tilfredsstillere måleapparatets spesifikasjoner, og som er mye lengre i h og n -retningen enn tykkelsen l som vist i Figur 16. Dette gjøres for å kunne neglisjere kanteffektene og anse diffusjonen som endimensjonal, betingelsene for neglisjering av kanteffektene er at $h \times n$ flaten må være mye større sammenlignet med tykkelsen l , samt at fuktopptaket må foregå med konstant omgivelsesfuktighet [14]. Kantene på prøvene klippes glatte for å unngå ujevnheter som lettere kan holde på overflatevann. Størrelsen til fuktopptaksprøvene er i tillegg begrenset av at måleapparatet (mettler toledo umx2) som har en maksimal kapasitet på 2,1 gram og målekammeret har begrenset med plass, samtidig som objektet som skal veies må kunne ligge på veieskålen uten kontakt med andre flater [20].



Figur 16. vannopptaksprøve [13].

3.4.2 Forberedelser for vannopptaksmåling

Det førstedøgnet i vannbeholderen vil materialet oppleve raskest fuktopptak og det skal utføres mange målinger, på mange prøver, over kort tid. Derav må utstyr som skal brukes vaskes og målestasjonen gjøres klar for måling på forhånd. Tørrvekten måles direkte etter at vannopptaksprøven tas ut av vakuumskapet, før de plasseres i vannbeholderen i varmeskapet. Når prøvene er tørre, vil de ta til seg fuktighet som følge av eksponering mot luft som har en høyere relativ fuktighet. Derfor er det viktig å bruke kortest mulig tid. Prøvene ville vert spesielt utsatt for fuktopptaket hvis de ble tatt ut av vakuumskapet ved 70 °C. Vannbeholderen prøvene plasseres i har på forhånd stått tilstrekkelig lenge i et varmeskap for å oppnå ønsket temperatur som i dette forsøket er 90 °C. Imens prøvene er til tørking, lages nummererte prøveholdere av syrefast ståltråd. Prøveholderne sørger for at prøvene ikke ligger på bunnen av vannbeholderen eller står inntil beholderveggen slik at vannopptaket blir påvirket som følge av mangel på eksponering mot vannet for en av hovedflatene. Samtidig som nummereringen sørger for å gjøre det lett å skille prøvene ifra hverandre når det skal utføres målinger. Måleoppsettet vises i Figur 17 og inneholder: Datamaskin for logging av vektdata, beholder med kaldt destillert vann, beholder med romtemperert destillert vann, elektrostatisk filter, to stk lofritt tørkepapir, en vekt og et pinsett som ikke er tegnet inn.



Figur 17. Målestasjon med: vannbeholder med kaldt destillert vann, vannbeholder med romtemperert destillert vann, elektrostatiskfilter, to tørkepapir, vekt og datamaskin for logging av vektdata [13].

3.4.3 Vannopptaksmåling

Prosesen for vannopptaksmåling for en prøve er som følger: Ta på hansker og ta ut prøven fra vakuumskapet med et rent pinsett. Prøven føres deretter igjennom det elektrostatiske filteret et par ganger for å fjerne elektrostatiske ladninger som vil forstyrre måleapparatet, før den plasseres i målekammeret. Tørrvekten, dato og klokkeslett registreres i en egen tabell i Excel, nummerert med samme nummer tilhørende prøveholderen som vannopptaksprøven skal plasseres i. Deretter plasseres prøven i holderen og puttes i vannbeholderen i varmeskapet. Intervallene for vannopptaksmålingene vises i Tabell 1, vannopptaket går saktere med tiden og etter 17 dager måles vannopptaket med større mellomrom.

Tabell 1. Måleintervall for vannopptak.

10 min	30 min	1 time	2 timer	3 timer	21 timer	26 timer	2 dager	3 dager	7 dager	10 dager	17 dager
-----------	-----------	-----------	------------	------------	-------------	-------------	------------	------------	------------	-------------	-------------

Dataprogrammet som registrer målingene stilles til å utføre automatisk vektmåling etter 60 sekunder. Dette gjøres da det trengs tid til å gjennomføre de nødvendige prosessene før målingen, og for at måleresultatene for alle prøvene skal ha samme forutsetning som gir et sammenlignbart resultat.

Nedtellingen startes og man har ett minutt på å få prøven igjennom de nødvendige stegene som følger og inn i målekammeret, som vist i Figur 17:

- Det benyttes ett rengjort pinsett til forflyttelse av prøven. Ta prøven ut av vannbeholderen i varmeskapet og putt den direkte ned i beholderen med kaldt destillert vann, her ligger den i cirka 10 sekunder. Dette gjøres for raskt å kjøle ned prøven og stenge det allerede diffunderte vannet inne og begrense diffusjon ut eller inn av materialet når prøven er omgitt med luft ut ifra om prøven har en høyere eller lavere relativ fuktighet relativt til luften. Vannbeholderen må ha en størrelse som gjør at prøven ikke øker temperaturen på vannet i for stor grad. Det skal utføres målinger på mange prøver og hvis temperaturen i det kalde vannet øker mye per prøve, vil det etter hvert være to vannbeholdere med romtemperert vann.
- Prøven flyttes over i den romtempererte vannbeholderen (destillert vann) og ligger der i cirka 10 sekunder. Dette gjøres for at prøven skal oppnå samme temperatur som omgivelsene slik at prøven ikke genererer konveksjonsstrømmer i målekammeret som kan påvirke måleresultatet.
- Prøven flyttes deretter til tørkepapir 1 for å tørke av overflatevannet. Prøven tørkes en gang til med tørkepapir 2 for å forsikre at alt overflatevann er fjernet, slik at det bare er vektendringen som følge av diffusjon som måles i målekammeret. Papiret er lofritt, uoppløselig i vann og produsenten garanterer for kontaminasjonsfritt papir før forseglingen er brutt.
- Prøven føres så igjennom det elektrostatiske filteret ett par ganger og videre inn i målekammeret.
- Når nedtellingen er ferdig registreres dataene automatisk i Excel og prøven settes i holderen å flyttes tilbake til vannbeholderen i varmeskapet for videre fuktopptak.

3.4.4 Vannopptaksmåling klimaskap

Situasjonen for fuktighetsopptaket for prøveobjektene i klimaskapet er annerledes fra vannopptaksmålingene beskrevet i kapittel 3.4.3 i form av at prøvene ikke er forlagt direkte i vann og at det her også måles på fuktopptaket til allerede prøveobjekt. Det ble laget en rekke prøveholdere til å holde fuktopptaksprøvene som plasseres i klimaskapet for kontrollmåling av fuktopptaket. Fuktopptaksprøvene plasseres i klimaskapet samtidig med prøveobjektene for dielektrisk responsmåling etter en felles tørkeprosess slik som beskrevet i 3.1.2. Hver prøveholder har tre fuktopptaksprøver, og det er laget tretti prøveholdere med nitti fuktopptaksprøver, fra både ualdrede og allerede prøveobjekt. Fuktopptaksprøvene i klimaskapet brukes som engangsprøver, derfor er det forberedt et så stort antall med prøver. Fuktopptaksprøvene som er ualdret og aldret er laget slik som beskrevet i 3.4.1.

For å ta ut prøvene av klimaskapet uten at luftfuktigheten og temperaturen synker for mye, benyttes et mindre prefabrikkert hull i klimaskapet som er tettet med en tilhørende propp.

Fuktopptaksprøvene tas ut med et langt pinsett og puttes direkte ned i en beholder med isvann (isbitene er laget av destillert vann). Deretter transporteres beholderen til målestasjonen og vektendringen måles for en prøve av gangen. Fuktopptaksmålingen utføres med samme metode som beskrevet i 3.4.3 med modifikasjonene:

- Prøveholderen tas ut av klimaskapet og puttes direkte ned i isvann.
- Beholderen med isvann transporteres til målestasjonen.
- Tidsuret starter nedtellingen på ett minutt og prøven som skal veies flyttes fra isvannet til den romtempererte vannbeholderen, her ligger den i 20 sekunder
- Resten av prosedyren er identisk med 3.4.3, med unntak av at fuktopptaksprøvene kastes etter måling.

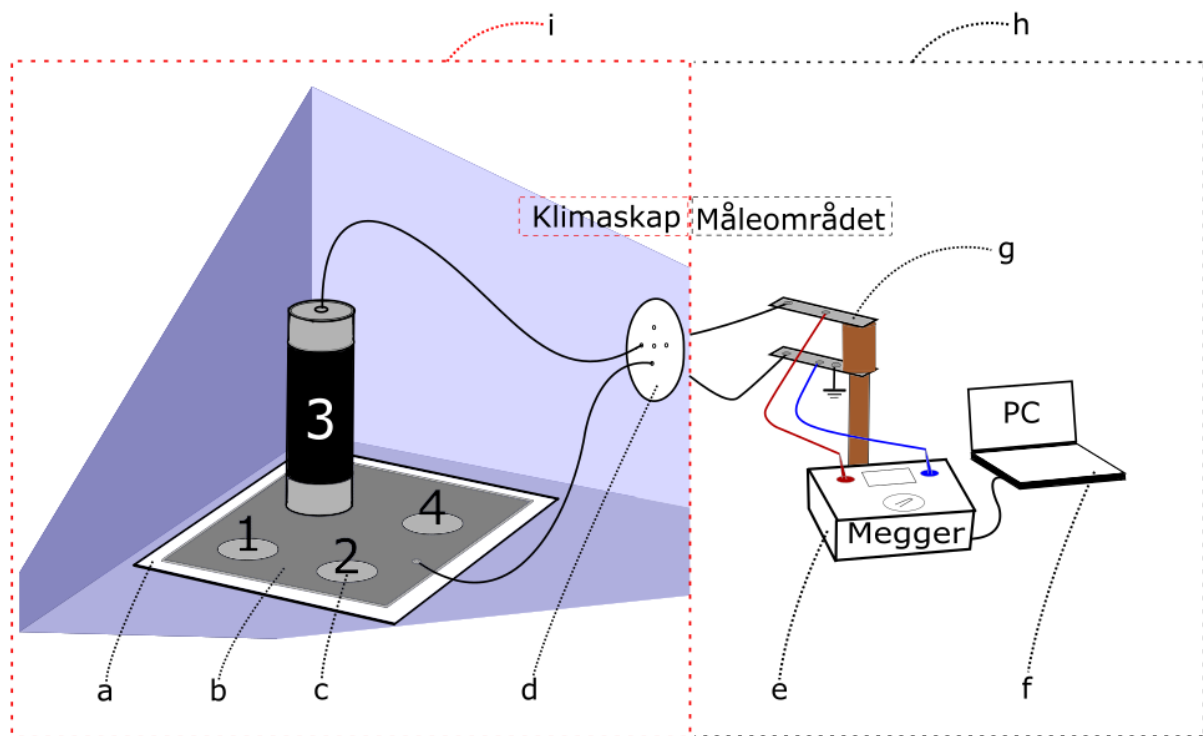
3.5 Dielektrisk respons

Det utføres systematisk en rekke dielektrisk responsmålinger i tidsdomenet med prøveobjektene plassert i et klimaskap. Målingene utføres på ualdrede og termisk aldrede prøveobjekter. For de dielektriske responsmålingene er det fastsatte spenningssekvenser med varierende spenninger for å undersøke om materialet er spenningsavhengig og om det eksisterer en hystereseeffekt. Klimaskapet gjør det mulig å endre temperaturen og luftfuktigheten i målekammeret, samt å holde disse konstante for å utføre tilstandskontroll av den feltstyrende krympestrømpen ved forskjellige klimatiske forhold.

3.5.1 Måleoppsett

Måleoppsettet er skissert i Figur 18 hvor:

- a) Er en elektrisk Isolerende plate laget av teflon. Oppgaven til isolasjonsplaten er å isolere prøveobjektens jord fra klimaskapets jord, slik at returstrømmen ved måling går til Megger og ikke tar en alternativ vei igjennom klimaskapets jordingsystem.
- b) Felles jordplate for prøveobjektene. Alle prøveobjektene er skrudd fast i jordplaten, samt en felles returkabel som går ut av klimaskapet og til jordskinna som er koblet til Megger sin jordterminal. Jordplaten sørger for at prøveobjektene står i ro og at det bare er nødvendig med en returkabel ut av klimaskapet.
- c) Tallene fra 1-4 representerer plasseringen til prøveobjektene. Ett av de fire prøveobjektene er tegnet inn på plass nummer 3. Alle prøveobjektene har hver sin kabelføring fra toppen av prøveobjektet og ut av klimaskapet. Kabelen til prøveobjektet som skal måles på er tilkoblet høyspentskinna og kablene til de resterende prøveobjektene er tilkoblet jordingskinna. Dette sørger for at bare det prøveobjektet som er satt til måling som gir strømbidrag, da de resterende objektene har jordpotensialet over seg.
- d) Gjennomføring for kablene fra inne i klimaskapet og ut til høyspentskinne og jordskinne. Det går fem PEX-kabler i gjennomføring, hvor en er felles returkabel og de resterende fire er høyspent målekabler festet i toppen på hvert sitt prøveobjekt.
- e) Isolasjonstester av typen «Megger MIT 525», isolasjonstesteren betegnes videre som «Megger». Megger genererer en sprangspenning som er justerbar mellom 0.5 og 5 kV, den har flere måleprogram, men i dette forsøket brukes programmet «polarisasjon og depolarisasjon» for dielektrisk responsmåling i tidsdomenet. Det er mulig å justere polarisasjon- og depolarisasjonstiden individuelt, med en maksimale individuelle tidslengden på 90 minutter. Megger har en nedre deteksjonsgrense på 0,01 [nA]. Tilkoblingsklemmene til Megger er koblet til høyspentskinne og jordskinne fra henholdsvis høyspentterminalen og jordingsterminalen.
- f: Datamaskin som er Koblet til Megger for å registrere måledataene.
- g: Skinnesystem for måling og jording, hvor høyspentskinnen er øverst og jordskinne nederst Brukes som knutepunkt for Megger og prøveobjekt, samt prøveobjektene som det ikke måles på er tilkoblet jordskinna.
- h: Måleområdet er merket med lys og skilt som viser til forsøk under spenning, samt området er innkapslet med gjerder og har låsbar inngang grunnet berøringsfare.
- i: Klimaskap, Brukes som målekammer for å holde konstant temperatur og relativ fuktighet for omgivelsene til prøveobjektene. Klimaskapet er låst og merket med høyspenning livsfare skilt.



Figur 18: Tegning av måleoppsettet for dielektrisk respons hvor: a) Isolerende plate av teflon, b) felles jordplate med returkabel for måling, c) plasseringen til prøveobjektene, hvor ett prøveobjekt er tegnet inn på plass nr 3, d) gjennomføring for kabler mellom klimaskap og måleområdet, e) Megger / isolasjonstester, f) datamaskin, g) høyspentskinne (øverst) og lavspentskinne (nederst), h) måleområdet og i) klimaskap

3.5.2 Måleprosedyrer

For å unngå å måtte åpne klimaskapet monteres de aldrede og ualdrede prøveobjektene inn i målekretsen samtidig. Prøveobjektene blir målt i tre steg ved tre forskjellige klima i målekammeret. Den første målesekvensen utføres ved lav temperatur (30 °C), så økes temperaturen (90 °C) og til slutt økes den relative fuktigheten til 85 % (ved 90 °C).

Før den relative fuktigheten økes til 85 % skulle målingene ved 30 og 90 °C ideelt sett vært utført ved 0 % RH. Klimaskapet har ingen tørkemekanisme slik at den relative fuktigheten er styrt av luftfuktigheten i rommet hvor klimaskapet er plassert. Dette er ikke et problem fordi prøveobjektene fuktighetsopptak går svært langsomt ved lav omgivelsesfuktighet. For at prøveobjektene skal oppnå en jevn temperatur tilsvarende den innstilte temperaturen til klimaskapet, blir prøveobjektene stående i en dag før målingene utføres. Dette er når prøveobjektene plasseres i klimaskapet og når temperaturen ved et senere tidspunkt økes.

Det måles på ett prøveobjekt om gangen da oppsettet bare har en Megger. Det vil ikke være mulig å skille strømbidraget fra de forskjellige prøveobjektene i fra hverandre om flere prøveobjekt ble målt i parallell. Det prøveobjektet som skal måles kobles til høyspentskinna og de resterende prøveobjektene forblir tilkoblet jordskinna sammen med returkabelen fra jordplaten. Jordingen av de resterende prøveobjektene sørger for at de ikke forstyrrer den pågående målingen i form av strømbidrag da de har jordpotensialet over seg.

Megger er koblet til både høyspent- og jordskinne, og det benyttes en datamaskin som er sammenkoblet med Megger for loggføring av dataene under måling. Programmet som brukes på datamaskinen heter «PowerDB lite» og registrerer 1 måling per sekund som inneholder spenning, strøm og tidsforløp. Måledataene fra de første 30 sekundene resulterer i høye strømmer på grunn av

Megger sine interne koblinger bruker tid til å bygge opp og holde klemmespenningen på det angitte nivået. Dermed benyttes bare måledata innhentet etter de første 30 sekundene.

Ønsket testspenning, polarisasjonstid og depolarisasjonstid stilles inn manuelt på Megger. For målingene er det brukt spenninger på 1, 2,5 og 5 kV, dette resulterer i et elektrisk felt på 0,01, 0,025 og 0,05 kV/mm, samt polarisasjon- og depolarisasjonstiden er begge satt til 45 minutter.

For målingen ved 30 og 90 °C, før den relative fuktigheten økes til 85 %, er målesekvensen per prøveobjekt henholdsvis utført med rekkefølgen 1, 2,5, 5 og 1 kV. På grunn av manglende tid er målingene ved 85 % RH begrenset til 1 og 5 kV i startfasen av fuktopptaket. Dette ble gjort for å kunne utføre målinger på flest mulig prøveobjekt i perioden hvor materialet raskt tar opp mye fukt.

Målesekvensene er oppsummert i Tabell 2, hvor tallene fra 1 til 4 indikerer hvor i målesekvensen den aktuelle målingen ble utført. F.eks for målingen med navnet «OBJ 1 (ualdret)» under kategorien «Dielektrisk respons målinger utført ved 30 °C og 20 % RH med 0,75 timer polarisasjon og 0,75 timer depolarisasjon» så betyr tallene 1 til 4 at det er utført fire målinger, samtidig som tallene 1 til 4 representerer rekkefølgen på målingene hvor 1 er utført først og 4 er utført sist. Målesekvensene som starter og slutter på samme spenning, utføres slik for å undersøke om målingene avviker fra hverandre der dem burde være tilnærmet identiske.

Tabell 2. Oversikt over utførte målinger, hvor nummere indikerer hvilken rekkefølgen målingene hadde i en gitt sekvens.

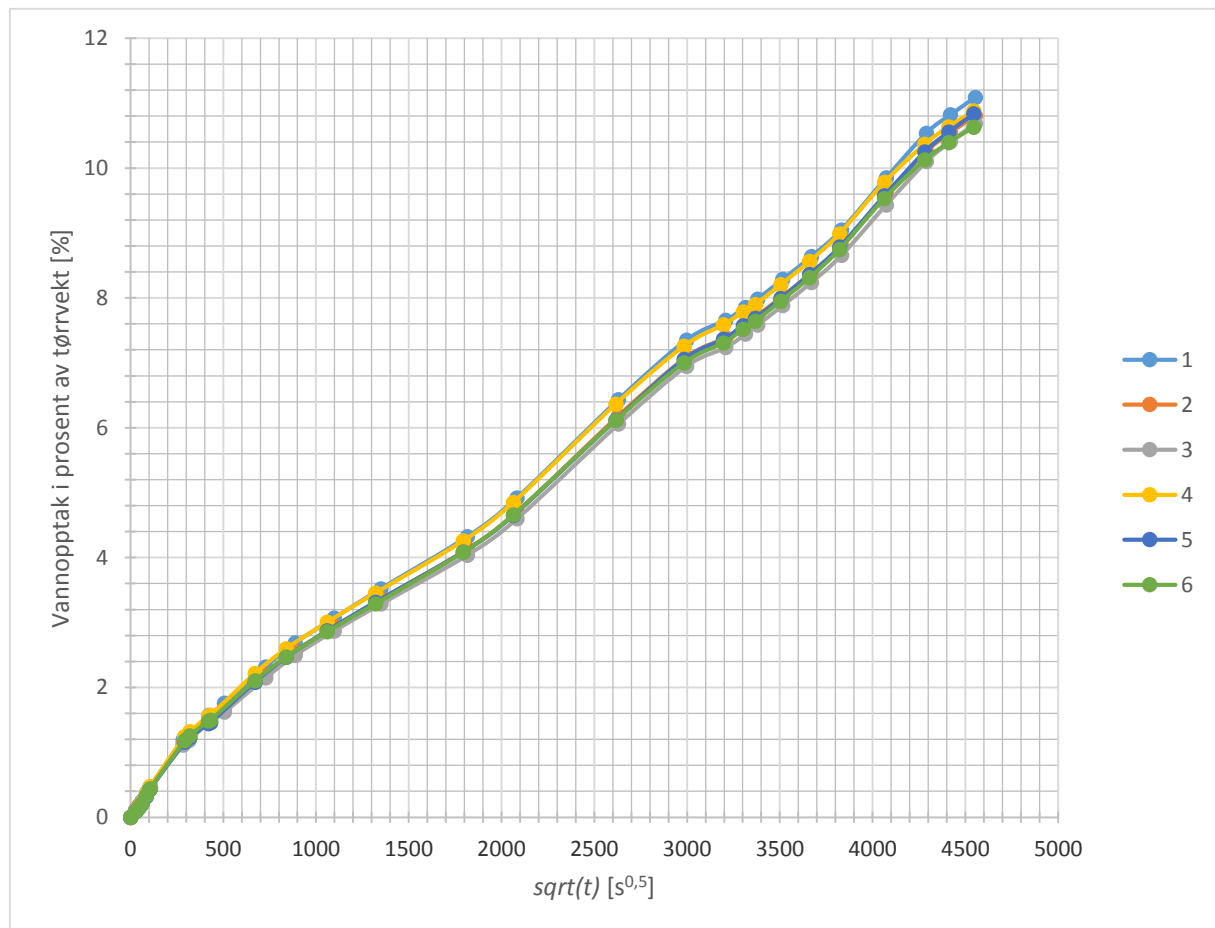
Spenning [kV]	1	2,5	5
E-felt [kV/mm]	0,01	0,025	0,05
<i>Dielektrisk respons målinger utført ved 30 °C og 20 % RH, med 0,75 timer polarisasjon og 0,75 timer depolarisasjon</i>			
OBJ 1 (ualdret)	1 og 4	2	3
OBJ 2 (ualdret)	1 og 4	2	3
OBJ 3 (aldret)	1 og 4	2	3
OBJ 4 (aldret)	1 og 4	2	3
<i>Dielektrisk respons målinger utført ved 90 °C og 10 % RH, med 0,75 timer polarisasjon og 0,75 timer depolarisasjon</i>			
OBJ 1 (ualdret)	1 og 4	2	3
OBJ 2 (ualdret)	1 og 4	2	3
OBJ 3 (aldret)	1 og 4	2	3
OBJ 4 (aldret)	1 og 4	2	3
<i>Dielektrisk respons målinger utført ved 90 °C og 85 % RH, med 0,75 timer polarisasjon og 0,75 timer depolarisasjon</i>			
OBJ 1 (ualdret)	1		2
OBJ 2 (ualdret)	1		2
OBJ 3 (aldret)	1		2
OBJ 4 (aldret)	1		2
<i>Dielektrisk respons målinger utført ved 90 °C og 85 % RH, med 0,75 timer polarisasjon og 0,75 timer depolarisasjon</i>			
OBJ 1 (ualdret)	1	2	3
OBJ 2 (ualdret)	1	2	3
OBJ 3 (aldret)	1	2	3
OBJ 4 (aldret)	1	2	3

4. Resultater og diskusjon

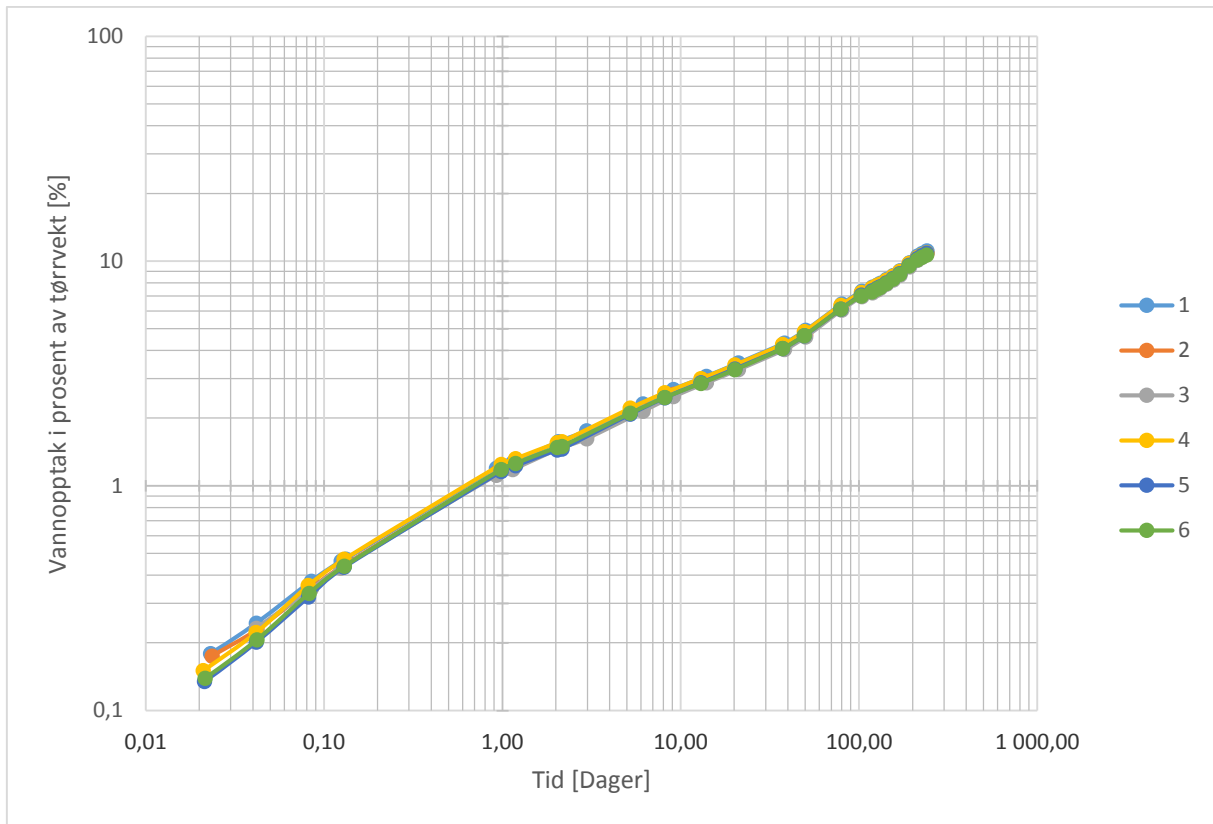
4.1 Vannopptak

4.1.1 Fuktopptaksmåling i vannbad ved 90 °C

Vannopptaksmålingene ble gjort med fremgangsmåten beskrevet i kapittel 3. Det ble valgt å benytte 90 °C for å oppnå et raskt vannopptak for både testobjektene og vannopptaksprøvene. Det ble antatt at materialets vannopptak skulle være fickisk med små variasjoner på grunn av materialets tilsetningsstoffer. Det ble laget 6 vannopptaksprøver for fuktopptaksmålingene i vann ved 90 °C og utviklingen over tid er vist i Figur 19 og Figur 20 som viser utviklingen med hensyn på kvadratroten av tiden og antall døgn. Vannopptaksprøvene har etter omtrent 240 dager oppnådd en vektøkning på ca. 11 % av tørrvekten og viser ennå ingen tegn til å gå i metning. Det observeres at vannopptaksprøvene over tid har svellet og blitt stivere som følge av det høye vannopptaket.



Figur 19. Vannopptak som funksjon av kvadratroten av tiden for ualdrede vannopptaksprøver i vann ved 90 °C.



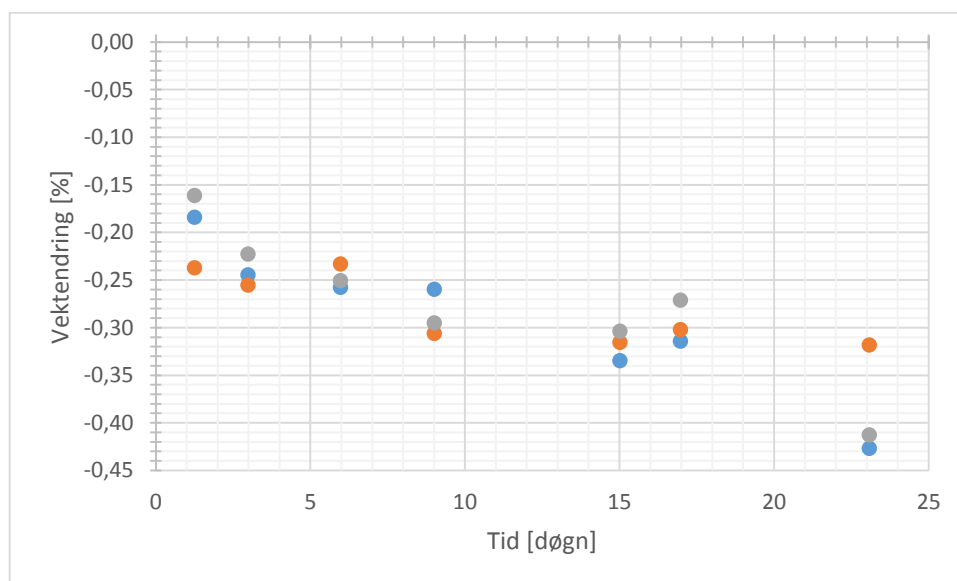
Figur 20: Log-log-plott av vannopptaket for ualdrede vannopptaksprøver i vann ved 90 °C.

Fra Figur 19 og Figur 20 er det klart at diffusjonen ikke følger Fickisk diffusjons type 1, da vannopptaket frem til nå ikke viser noe tegn til metning. For videre arbeid så burde vannopptakets videre utvikling følges opp og etter at metningsgrensen er nådd, kan andre diffusjonstyper utforskes for å se etter relasjoner.

4.1.2 Vannopptaksprøver i fuktig luft

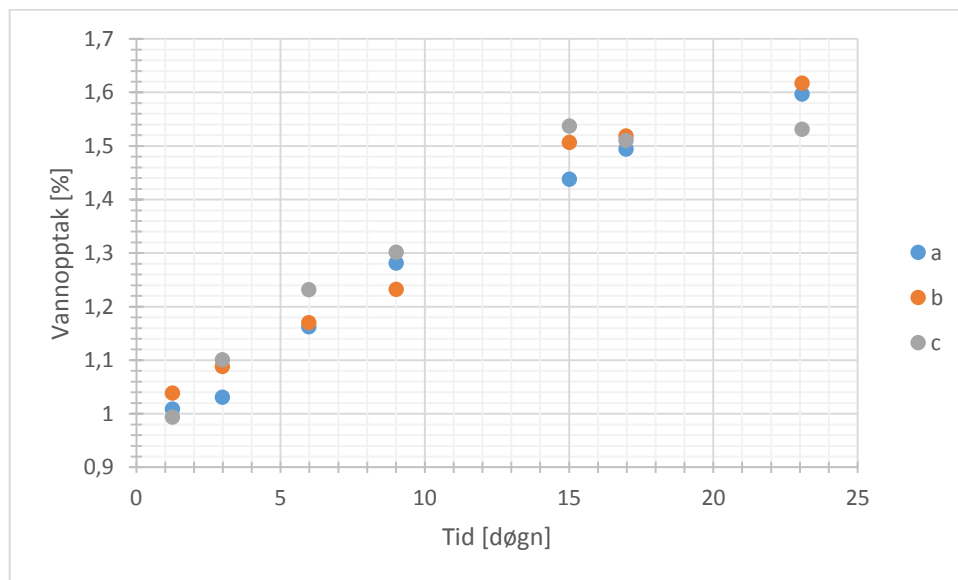
Det ble plassert fuktopptaksprøver laget fra aldrede og ualdrede prøveobjekt for kontrollmåling av fuktopptaket til prøveobjektene i klimaskapet, samtidig som prøveobjektene ble montert i målekretsen. Hver fuktopptaksmåling besto av tre fuktopptaksprøver. Fuktopptaksprøvene var engangsprøver, og tørrvekten ble målt etter en tørkeprosess som er beskrevet i 3.1.2.

Resultatene fra fuktighetsopptaksmålingene for ualdrede og aldrede prøver vises i henholdsvis Figur 21 og Figur 22. Tilhørende tabeller er å finne i vedlegg B2. Aldrede og ualdrede vannopptaksprøver i fuktig luft. Det var forventet at fuktopptaket for de ualdrede fuktighetsopptaksprøvene plassert i klimaskapet skulle ha samme forløp som for de ualdrede fuktopptaksprøvene plassert i vann. Dette var ikke tilfellet og resultatet for fuktopptaket til de ualdrede fuktopptaksprøvene i klimaskapet viser negative verdier som tilsier en reduksjon i vektendringen. Fuktopptaksprøvene er på forhånd tørket og utgasset ved tørkeprosedyren beskrevet i 3.1.2. Ved en temperatur på 90 °C og 85 % relativ fuktighet vil materialet ta opp fuktighet på grunn av forskjellen i partialtrykk til vann i og utenfor prøven. Prøvene har fri tilgang på oksygen og det kan være at de langkjedete antioksidantene i materialet blir forkortet ved hydrolyse og deretter kan diffundere ut av prøven. I tillegg kan det være flyktige stoffer som også kan diffundere ut av prøven og evt. legge seg på overflaten. Eventuell akkumulasjon av stoff på overflaten vil kunne tørkes løst ved tørking av prøven før vektendringen måles. (Dette gjelder både prøver i fuktig luft og i vannbad) Materialets vannopptak kan også påvirkes av videre oksidasjon i klimaskapet.



Figur 21: Tidsutviklingen av vektendringen for ualdret prøveobjekt plassert i klimaskap ved 90 °C og relativ fuktighet på 85 %.

De aldrede fuktighetsopptaksprøvene derimot, viser en vektøkning over tid som forventet. Ved å sammenligne fuktighetsopptaket for aldrede fuktighetsopptaksprøver plassert i klimaskapet og fuktighetsopptaksprøvene plassert i vannbad observeres det at fuktighetsopptaket for begge etter ett døgn er ca. 1 %. Fuktighetsopptaket for de aldrede fuktighetsopptaksprøvene øker videre etter ett døgn, men fuktighetsopptaket øker med omtrent halve hastigheten av de ualdrede fuktighetsopptaksprøvene i vann ved 90 °C. Disse er riktignok ualdrede, men det var forventet at de aldrede fuktighetsopptaksprøvene ville ta opp fuktighet minst like raskt eller raskere, pga. mulig dannelse av hydrofile oksidasjonsprodukter og eventuelt sprekke dannelse fra aldringen som gir økt overflate for vannabsorpsjon. Det er også mulig at de aldrede fuktighetsopptaksprøvene mister masse gjennom utdiffundering, men det skulle da i så fall også være tilfellet for de ualdrede fuktighetsopptaksprøvene i vannbadet. Materialet kan være vannløselig og siden alle prøvene tørkes før vektendringen måles vil dette også kunne tørkes av før målingen. De aldrede prøvene har stått i 7 døgn ved 150 °C for aldring. Det er mulig at mesteparten av det ukjente massetapet i form av utdiffundering foregikk under aldringsprosessen.



Figur 22: Tidsutviklingen av fuktighetsopptaket for aldret prøveobjekt plassert i klimaskap ved 90 °C og relativ fuktighet på 85 %.

4.2 Strekkprøving

Strekkprøving er brukt for å bestemme graden av aldring for prøveobjektene og det var ønskelig å minimum halvere den maksimale forlengelsen før brudd. Det ble påvist tilstrekkelig aldring etter 7 døgn aldring ved 150 °C i lufttilført varmeskap. Tabell 3 viser sammenligningsgrunnlaget fra strekkprøvingen og all data fra strekkprøvingene vises i vedlegg C. Strekkprøvingene fra samme prøveobjekt varierer siden strekkprøvene har forskjellig tykkelse da det ikke er mulig å utføre en homogen krymp. Det er tidligere nevnt i 3.3.1 at det er krav til minimum fem strekkprøver fra prøven som skal karakteriseres. Tabell 3 gir derfor en oversikt over minimum, maximum og mean –verdier fra testingen. Fra tabellen kan man se at den allerede strekkprøven har en forlengelse før brudd på mellom 63 og 97 %, som er veldig nært den definerte levetiden [18]. Ut ifra det valgte sammenligningsgrunnlaget vist i nedre del av Tabell 3 så kan det konkluderes med at den feltstyrende slangen har oppnådd ønsket aldringsgrad.

Tabell 3: Resultater fra strekkprøving av aldret og ualdret prøveobjekt, med endringen i form av aldret/ualdret i nedre del av tabellen.

Aldret	Maximum	Minimum	Mean	Median
Load at Maximum	105.86 N	82.659 N	90.992 N	84.699 N
Extension at Maximum	19.422 mm	12.603 mm	17.532 mm	18.475 mm
Work to Maximum	1.3070 J	0.67712 J	1.0345 J	1.0682 J
Percentage Strain at Maximum	97.111	63.013	87.659	92.377
Tensile Strength	16.039 MPa	11.480 MPa	14.441 MPa	15.234 MPa
Extension at Yield	19.422 mm	18.046 mm	18.764 mm	18.794 mm
Ualdret	Maximum	Minimum	Mean	Median
Load at Maximum	130.12 N	116.79 N	123.93 N	124.40 N
Extension at Maximum	58.258 mm	49.074 mm	54.269 mm	54.872 mm
Work to Maximum	3.9704 J	3.4635 J	3.6682 J	3.6194 J
Percentage Strain at Maximum	291.29	245.37	271.34	274.36
Tensile Strength	20.144 MPa	18.716 MPa	19.515 MPa	19.599 MPa
Extension at Yield	43.964 mm	20.042 mm	32.003 mm	32.003 mm
Aldret / Ualdret	Maximum	Minimum	Mean	Median
Load at Maximum	0,81	0,71	0,73	0,68
Extension at Maximum	0,33	0,24	0,31	0,34
Work to Maximum	0,33	0,20	0,28	0,30
Percentage Strain at Maximum	0,33	0,26	0,32	0,34
Tensile Strength	0,80	0,61	0,74	0,78
Extension at Yield	0,44	0,90	0,59	0,59

4.3 Dielektrisk respons

Det ble plassert to ualdrede og to termisk aldrede prøveobjekt i målekretsen i klimaskapet etter en felles tørkeprosess, med tilhørende vannopptaksprøver. De dielektriske responsmålingene ble utført i tre steg hvor prøveobjektene først ble karakterisert ved to forskjellige temperaturer i tørr tilstand. Deretter ble den relative fuktigheten i klimaskapet økt til 90 % og like etter redusert til 85 % på grunn av kondens. Utsatt for den høye luftfuktigheten så vil prøveobjektene ta opp mer og mer vann over tid. Alle dielektrisk responsmålinger ble utført med 45 minutter polarisasjon og påfølgende 45 minutter depolarisasjon. Tabell 4: Oversikt over de aldrede og ualdrede prøveobjektene for dielektrisk responsmålinger. Tabell 4 viser en oversikt over prøveobjektene med tilhørende fargekoder, fargekodene er brukt videre der det er hensiktsmessig.

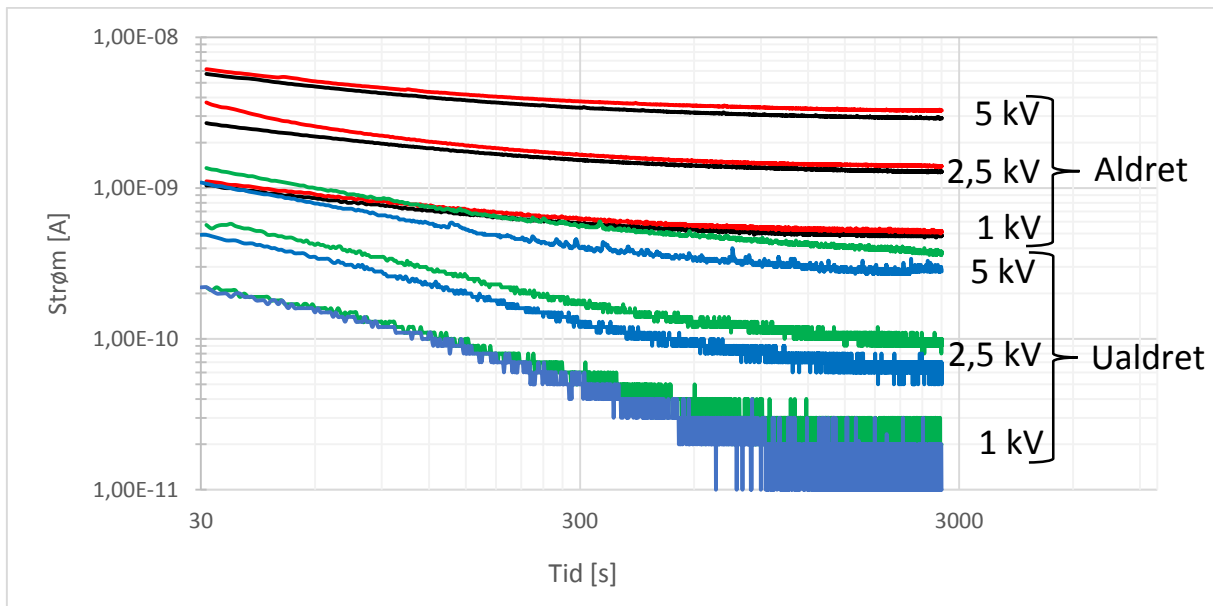
Tabell 4: Oversikt over de aldrede og ualdrede prøveobjektene for dielektrisk responsmålinger.

Navn på prøveobjektet	Fargekode i grafene	Aldret?	Aldringstemperatur [°C]	Aldringslengde [Døgn]
OBJ1	Blå	Nei	-	-
OBJ2	Grønn	Nei	-	-
OBJ3	Sort	Ja	150	7
OBJ4	Rød	Ja	150	7

4.3.1 Prøveobjekt i tørr tilstand ved 30 og 90 °C

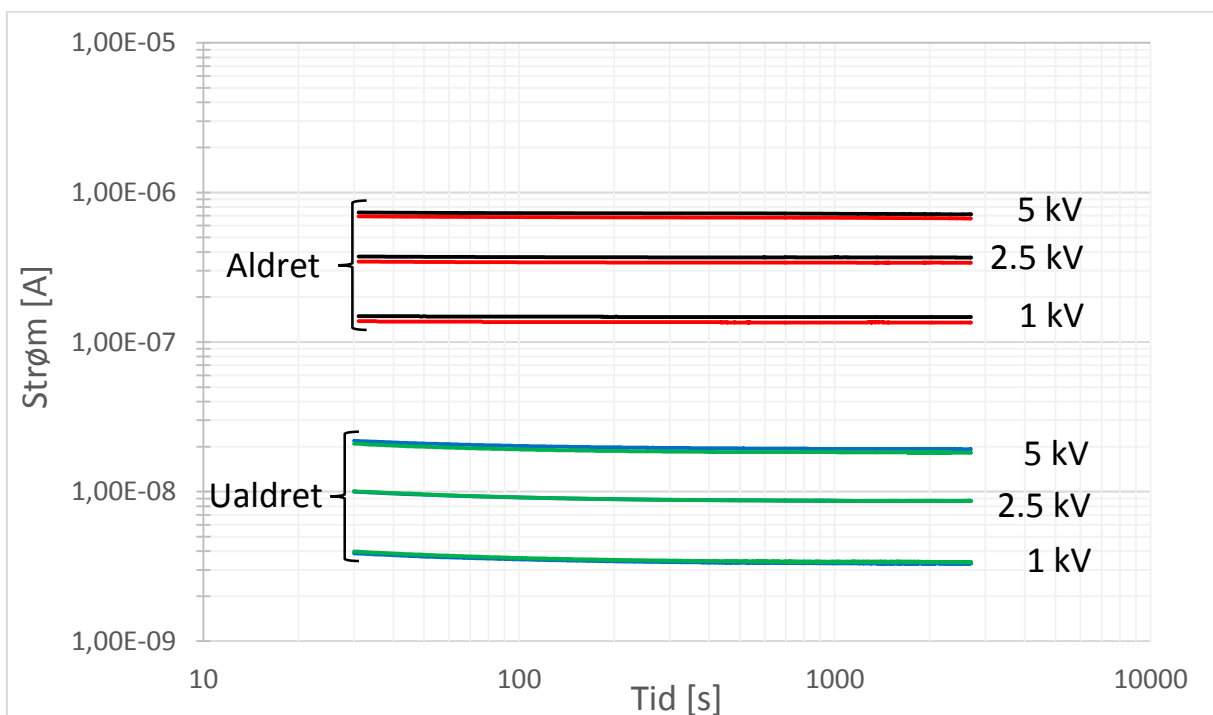
Først ble det utført dielektrisk responsmåling ved 30 °C og ca. 20 % RH, for så å øke temperaturen til 90 °C med en relativ fuktighet på ca. 10 %. Som tidligere nevnt skulle det ideelt sett vært 0 % RH, men klimaskapet har ingen tørkemekanisme og klarer i ikke å regulere luftfuktigheten ved lave innstillinger (lav RH), slik at luftfuktigheten styres av omgivelsesfuktigheten i rommet hvor klimaskapet er plassert. Testobjektene tar opp svært lite fukt ved lav relativ fuktighet, så fuktopptaket regnes som neglisjerbart, noe som er verifisert med kontrollmålingene av fuktopptaket vist i kapittel 4.1.2. Fuktopptaket en dag før fuktigheten ble økt i klimaskapet var under 0,1 % for de aldrede og negativ for de ualdrede (se vedlegg B2 for tabell). Målinger utført før den relative luftfuktigheten ble satt til 85 % blir videre referert til som «tørre».

Figur 23 viser polarisasjonsstrømmene som funksjon av tid for prøveobjektene ved 30 °C. De aldrede prøveobjektene er representert med fargene rødt og sort, og de ualdrede med blått og grønt. Spenningsnivåene i grafen representerer klemmespenningen til Megger ved målingene. Fra Figur 23 kan man se at under identiske forhold så øker strømmen med ca. 1 dekad for hvert spenningsnivå for de aldrede prøveobjektene kontra de ualdrede. Det er verdt å merke seg at strømmens sluttverdi for aldret prøveobjekt ved 1 kV er høyere enn for ualdret objekt ved 5 kV. Strømmens sluttverdi for de ualdrede prøveobjektene ved 1 og 2.5 kV er i området og lavere enn Megger sin nedre deteksjonsgrense på 0,01 [nA] og blir dermed ikke brukt i de videre analysene.



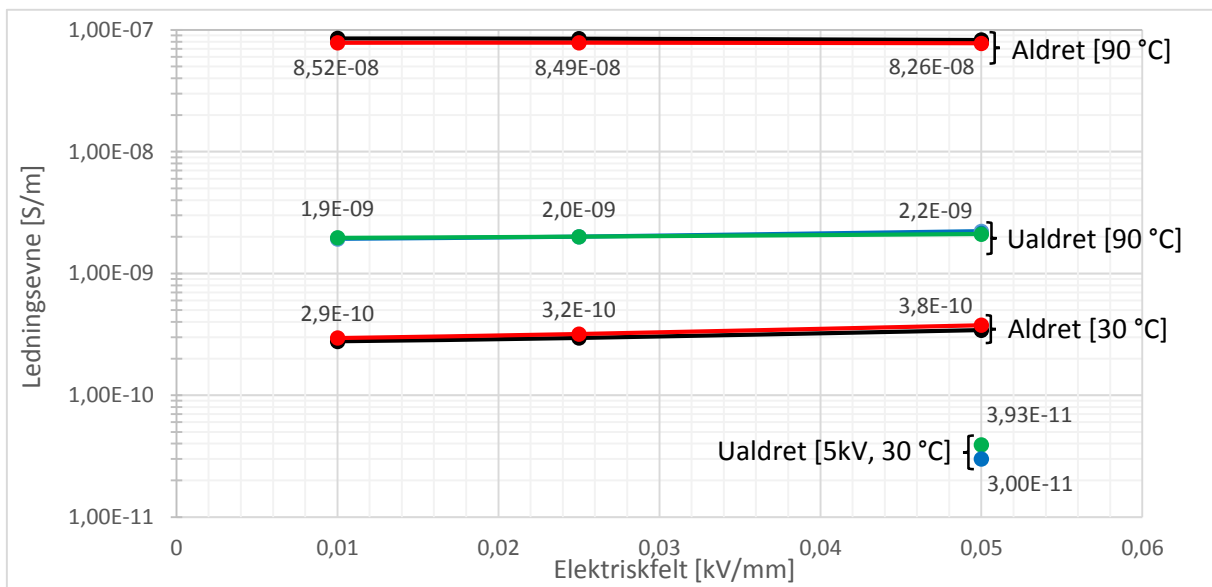
Figur 23: Log-log-plott av polarisasjonsstrømmene ved 1, 2,5 og 5 kV for aldret (OBJ3 i svart og OBJ4 i rødt) og ualdret (OBJ1 i blått og OBJ2 i grønt) prøveobjekt ved 30 °C i tørr tilstand.

Temperaturen i klimaskapet ble økt til 90 °C og prøveobjektene sto i klimaskapet i ett døgn for å oppnå jevn temperatur før målingene ble utført. Polarisasjonsstrømmen som funksjon av tiden for prøveobjektene ved 90 °C er vist i Figur 24. Forskjellen mellom aldret og ualdret prøveobjekts strømføringsevne har økt ytterligere fra målingene ved 30 °C. Ved å sammenligne strømstørrelsene i Figur 24 så er strømverdien for de aldrede rundt 40 ganger større enn for de ualdrede ved tilsvarende spenningsnivå. For de aldrede prøveobjektene har strømverdiene ved 90 °C økt med over 200 ganger i forhold til ved 30 °C, mens de ualdrede har en økning på rundt 60 ganger ved 5 kV.



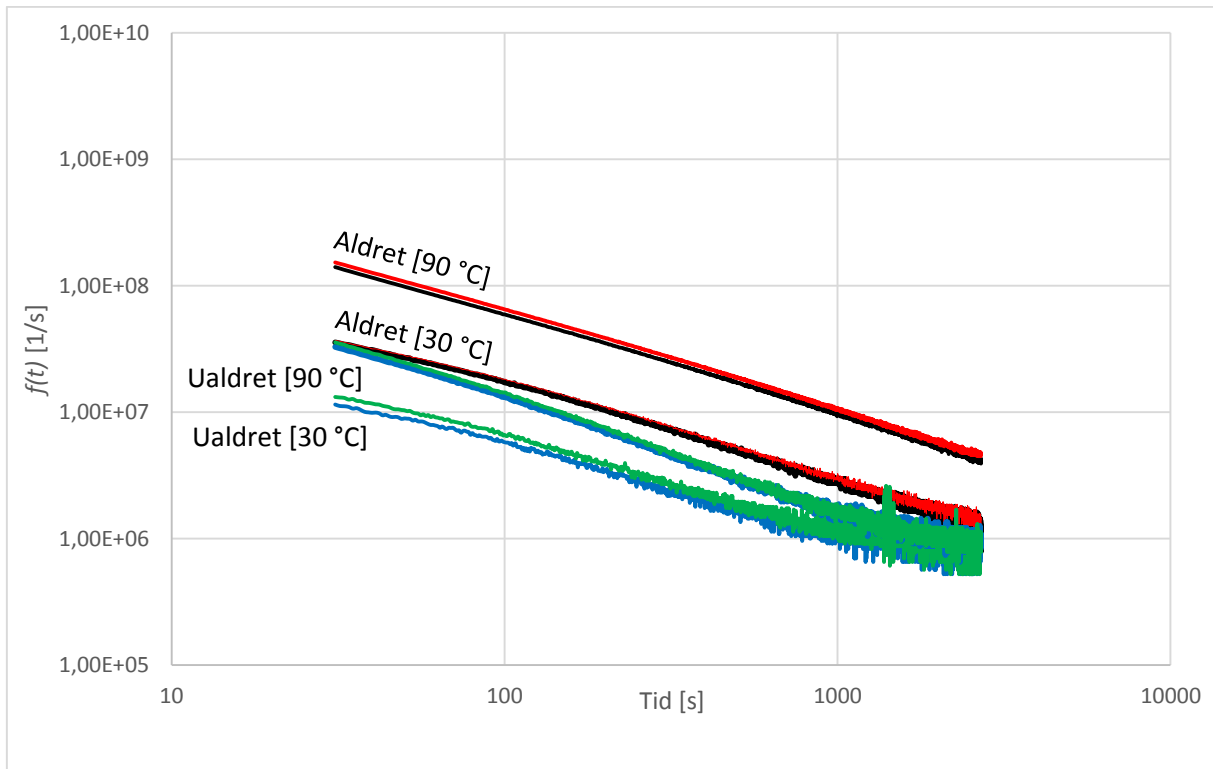
Figur 24: Log-log-plott av polarisasjonsstrømmen for aldrede og ualdrede prøveobjekt ved 1, 2,5 og 5 kV, ved 90 °C i tørr tilstand.

Ledningsevnen som funksjon av elektrisk felt er plottet for de aldrede og ualdrede prøveobjektene ved 30 og 90 °C i Figur 25. Ledningsevnen er vist i logaritmisk skala og er beregnet ved å ta gjennomsnittet av de siste 100 målepunktene ved bruk av ligning (3) (se også vedlegg D2). Ledningsevnen for de ualdrede prøveobjektene ved 30 °C er kun plottet for 0,05 kV/mm på grunn av Megger sin nedre deteksjonsgrense som nevnt i forrige avsnitt. I Figur 25 viser ledningsevnen for de aldrede prøveobjektene ved 30 °C og de ualdrede prøveobjektene ved 90 °C en svakt feltavhengighet. For de aldrede prøveobjektene observeres ingen feltavhengighet ved 90 °C og ledningsevnen anses som konstant. Det høyeste feltet som er brukt (0,05 kV/mm) er et relativt lavt felt og det er derfor ikke uventet at det er liten/ingen feltavhengighet. Ved å sammenligne de aldrede og ualdrede prøveobjektene ut ifra samme elektrisk feltstyrke så øker ledningsevnen med omtrent 1 dekadere for de aldrede kontra de ualdrede ved 30 °C. Forskjellen i ledningsevnen mellom aldrede og ualdrede prøveobjekt øker ytterligere ved 90 °C.



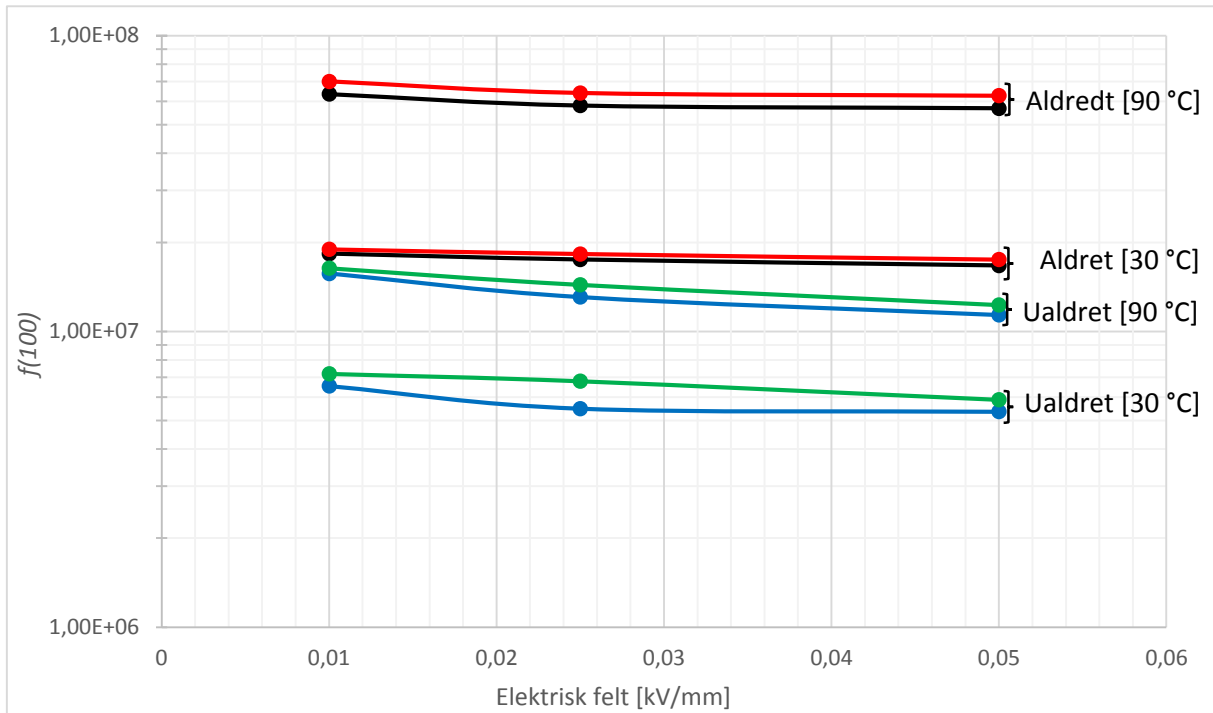
Figur 25: Ledningsevne som funksjon av elektrisk felt for aldrede og ualdrede prøveobjekt, ved 30 og 90 °C med henholdsvis relativ luftfuktighet på 20 og 10 %.

Den dielektriske responsfunksjonen $f(t)$ for de forskjellige spenningsnivåene er overlappende og gjennomsnittet vises med et log-log-plott i Figur 26 (responsfunksjonene vises i sin helhet i vedlegg A2). Responsfunksjonene benytter depolarisasjonsstrømmen og er beregnet med ligning (4). Absoluttverdien av depolarisasjonsstrømmen følger en eksponentielt avtagende kurve som går mot 0 og vil med unntak av aldret prøveobjekt ved 90 °C etter en viss tid ha så lave verdier at de er i området til deteksjonsgrensen for Megger, det tydeliggjøres ved at kurven mister skarphet og at verdiene blir ustabile og «hopper» opp og ned.



Figur 26: Dielektriske responsfunksjon $f(t)$ for aldrede og ualdrede prøveobjekt ved 30 og 90 °C.

I Figur 27 er den dielektriske responsfunksjonen ved $t = 100$ plottet som funksjon av det elektriske feltet. Fra Figur 27 observeres det en liten omvendt spenningsavhengighet, samt at $f(100)$ for tilsvarende elektriskfelt for de aldrede kontra de ualdrede prøveobjektene har en verdi tilsvarende mer enn det dobbelte og firedobbelte ved henholdsvis 30 og 90 °C. Ved å sammenligne $f(100)$ for aldret prøveobjekt ved 90° mot ualdert prøveobjekt ved 30 °C er økningen på ca. 1 dekad.



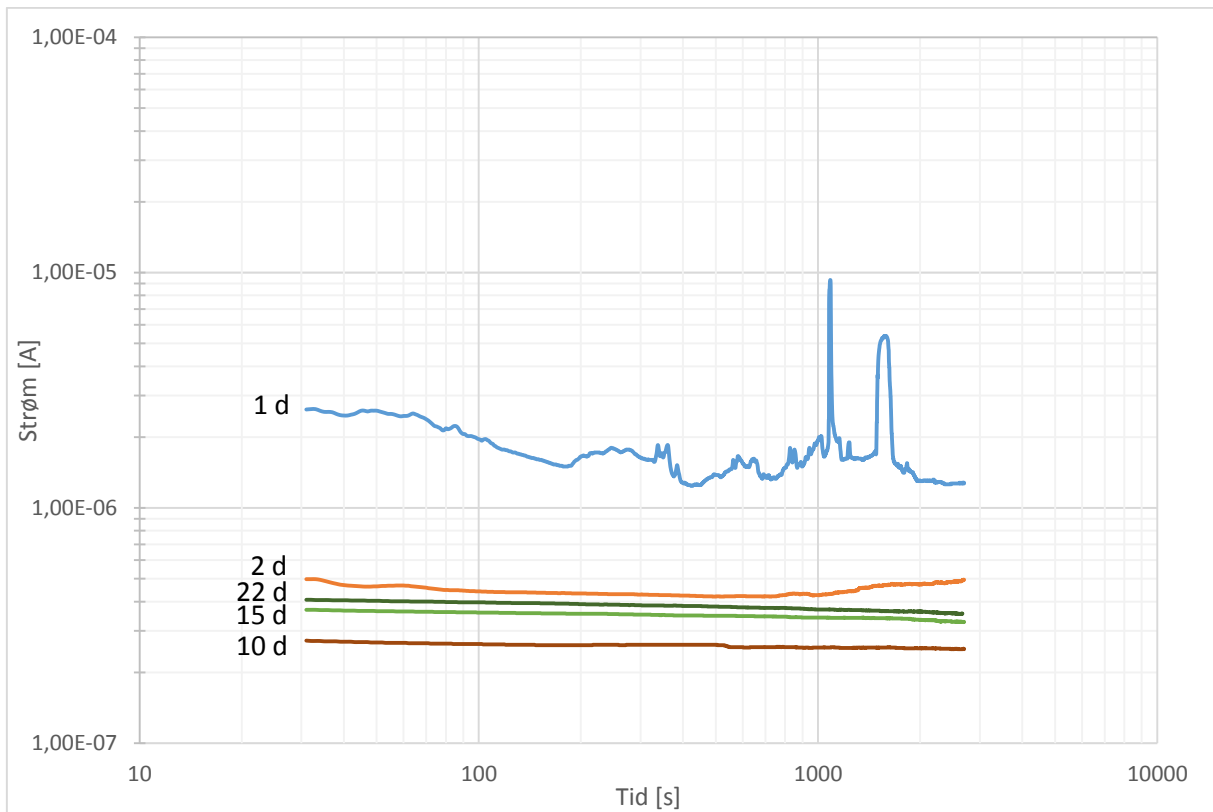
Figur 27: Dielektrisk responsfunksjon ved tiden $t = 100$ som funksjon av elektrisk felt, ved 30 og 90 °C for aldrede og ualdrede prøveobjekt.

4.3.2 90 °C, 85 RH, polarisasjon- og depolarisasjonsmålinger

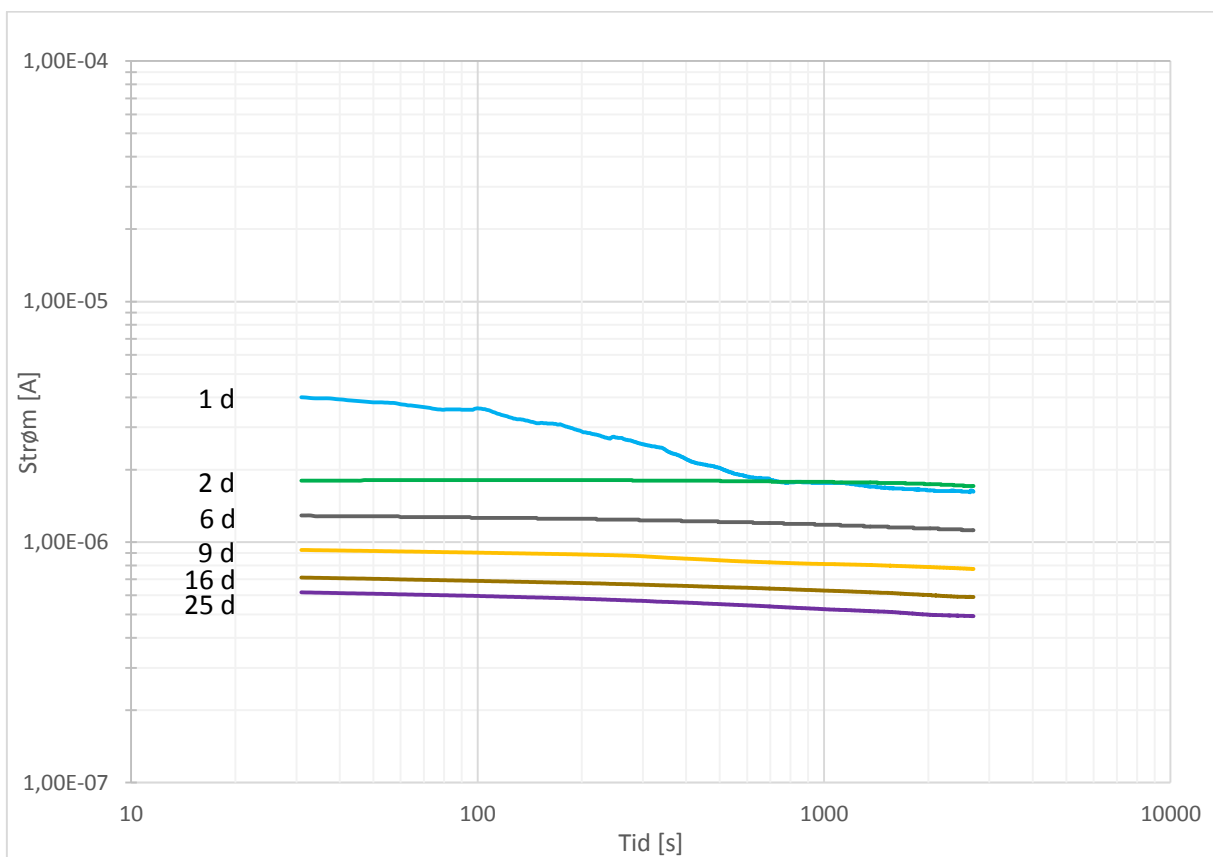
Etter at de dielektriske responsmålingene for prøveobjektene i tørr tilstand ved 30 °C og 90 °C var utført, ble den relative fuktigheten i klimaskapet økt til 90 %. Dette resulterte i dannelse av kondens, noe som sannsynligvis påvirket de første målingene. Dette ble løst ved å nedjustere den relative luftfuktigheten til 85 %.

Polarisasjonsstrømmen for ualdret og aldret prøveobjekt (OBJ1 og OBJ3) ved 0,01 kV/mm vises henholdsvis i Figur 28 og Figur 29 (Se vedlegg A1 for strøm-tid kurver for alle prøveobjekt ved 0,01 og 0,05 kV/mm ved 90 °C og 85 % RH). Hvert prøveobjekt måles først ved 0,01 kV/mm og deretter ved 0,05 kV/mm før neste prøveobjekt måles etter prosedyrene gitt i 3.5.2. De første målingene utført ved 0,01 og 0,05 kV/mm for alle prøveobjektene etter påsatt fuktighet avviker fra de andre målingene i form av at strømmen er fluktuerende og mye høyere. Målingene ble utført ved 90 % RH og som tidligere nevnt resulterte det i kondens og dråpedannelse. Dette kan gi koronautladning som påvirker strømmålinger og antas dermed å være grunnen for de avvikende målingene.

Det var forventet en økning i strømmen som funksjon av økende fuktighet. Måleresultatene viser derimot det motsatte, strømmen øker sammenlignet med tørr tilstand, men synker som funksjon av økende fuktighet med unntak av OBJ4 som igjennom hele perioden holdt en konstant strøm med hensyn på den økende fuktigheten (se vedlegg A1 Figur 41 og Figur 42). Strømmen til de ualdrede prøveobjektene begynte å øke litt igjen etter ca. 10 døgn. Denne økningen er derimot minimal og det kan se ut til at strømmen har stabilisert seg. For både de aldrede og ualdrede prøveobjektene så synker strømmen som funksjon av den økende fuktigheten. En mulig forklaring på strømreduksjonen er at flyktige stoffer diffunderer ut av prøveobjektet og legger seg som et belegg mellom elektrode og prøveobjekt og gir økt resistans. I tillegg kan det være tilsetningsstoffer i den feltstyrende krympestrømpen som ved reaksjon med vann gir forskjellige utfall som f.eks. lavere ledningsevne. Ved en temperatur på 90 °C kan det heller ikke utelukkes en videre degradering i form av oksidasjon av materialet. Videre materialanalyse av de respektive prøveobjektene må utføres for å se etter svar. Det kan f.eks. utføres DSC (Differential scanning calorimetry) målinger for å undersøke endringer i prøveobjektens faseoverganger. I tillegg kan det også utføres en såkalt «oxidation induction time» måling (OIT), hvor den termiske stabiliteten i materialet bestemmes. Materialet varmes opp til smeltepunktet med nitrogenatmosfære. Deretter holdes temperaturen stabil og oksygen blir tilført og tiden til endring i varmetilførselen oppstår måles. OIT kan dermed brukes for å sjekke graden av oksidasjon av materialene.



Figur 28: Log-log-plott av polarisasjonsstrømmen ved 0,01 kV/mm for ualdret prøveobjekt [OBJ1]. Antall døgn med påsatt fuktighet er markert i grafen.



Figur 29: Log-log-plott av polarisasjonsstrømmen ved 0,01 kV/mm for aldret prøveobjekt [OBJ3]. Antall døgn med påsatt fuktighet er markert i grafen.

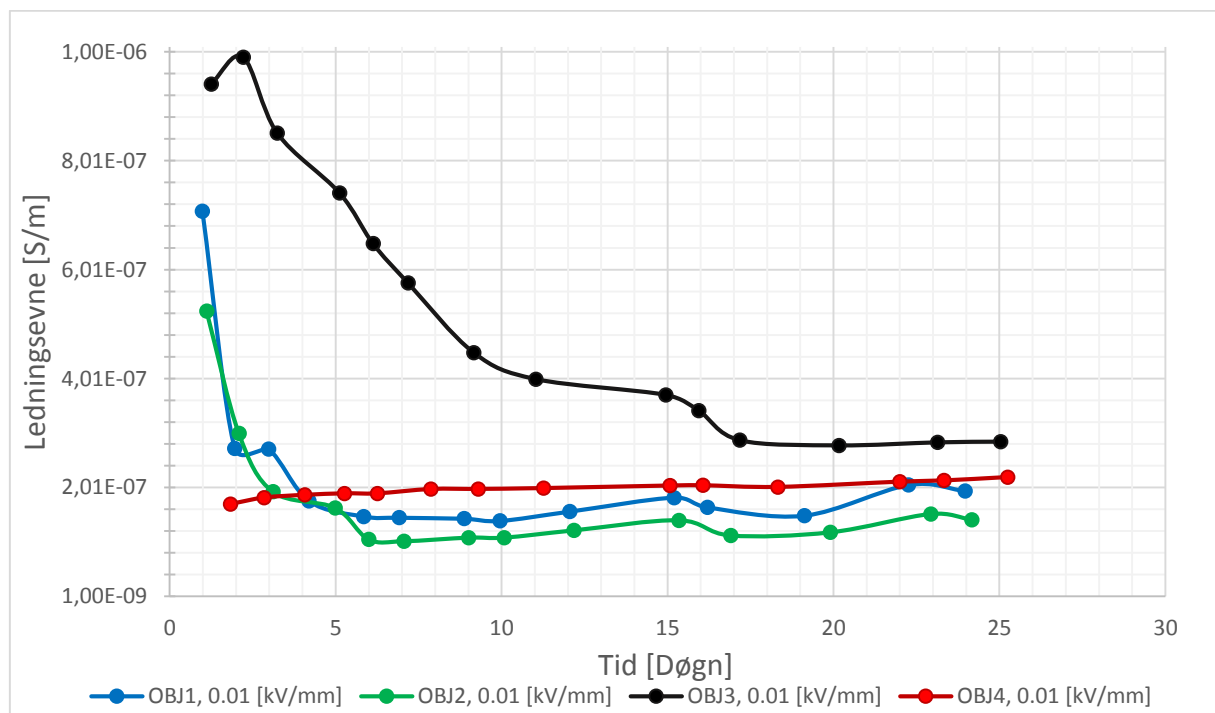
I Figur 30 vises tidsutviklingen av den beregnede ledningsevnen ved 0,01 kV/mm for aldrede og ualdret prøveobjekt [OBJ1-4], med hensyn på antall dager i fuktighet (Tidsutviklingen for ledningsevnen ved 0,05 kV/mm vises i vedlegg A5 Figur 64). Ledningsevnen synker raskt de første dagene for OBJ1-3, men ser ut til å stabilisere seg etter rundt 6 døgn for OBJ 1 og 2, og etter 20 døgn for OBJ3. Ledningsevnen er marginalt høyere for de aldrede prøveobjektene. OBJ4 avviker fra alle de andre prøveobjektene ved at ledningsevnen holder omtrent en konstant verdi med hensyn på økende fuktighetsopptak. Ledningsevnen til OBJ 3 og 4 var tilnærmet identiske før fuktigheten ble økt (Figur 25), og begge prøveobjektene har på forhånd gjennomgått samme aldringsprosess. Det ser ut til at aldringsprosessen har påvirket OBJ4 i større grad enn OBJ3, siden OBJ3 følger samme trend som de ualdrede prøveobjektene.

Ved å ta utgangspunkt i de stabiliserte verdiene av ledningsevnen (for OBJ 1 og 2, Figur 30, fra 5 døgn og utover) og sammenligne mot tørr tilstand ved samme temperatur (90 °C, Figur 25), så bidrar fuktigheten med en økning i ledningsevnen for de ualdrede prøveobjektene med en faktor på ca. 100.

Ledningsevnen til de aldrede prøveobjektene er mindre påvirket av fuktopptaket. Ved å sammenligne ledningsevnen fra tørr tilstand (90 °C, Figur 25) til fuktig tilstand (90 °C, Figur 30, fra 17 døgn og utover) observeres det en økning med en faktor på 2-3.

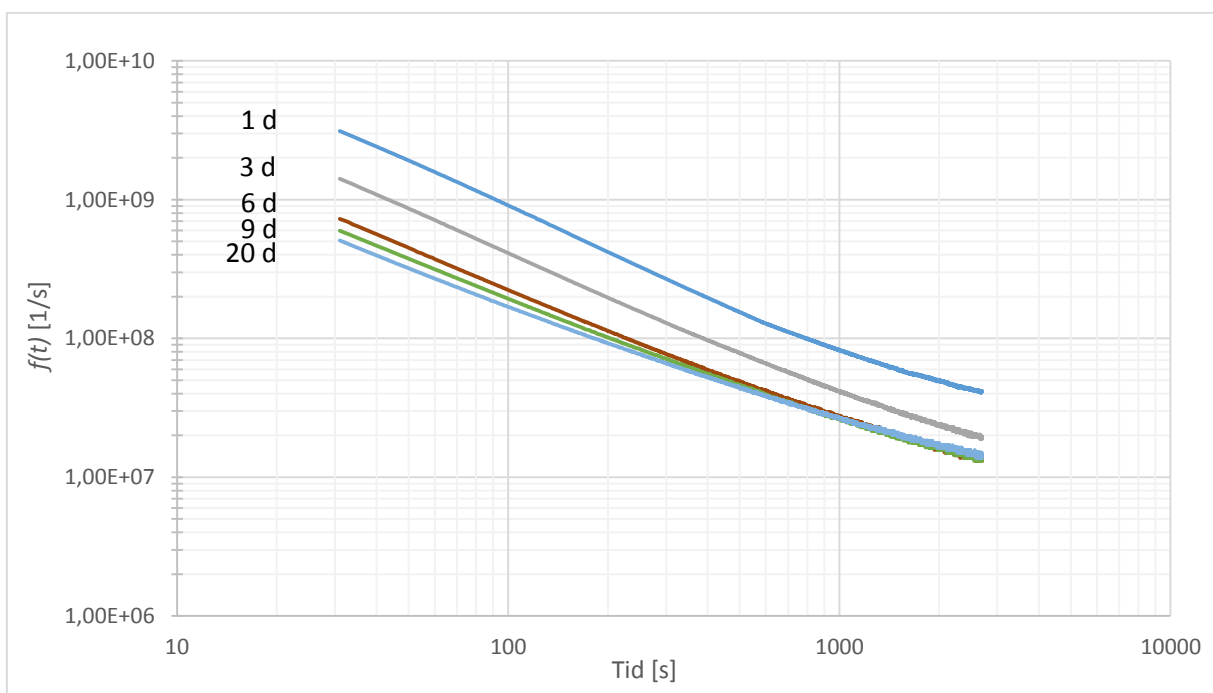
Ved å sammenligne ledningsevnen ved 90 °C i fuktig tilstand (Figur 30, fra 17 døgn og utover) opp mot ledningsevnen ved 30 °C i tørr tilstand (Figur 25) så har ledningsevnen for de ualdrede prøveobjektene økt med over 3 dekader, og litt under 3 dekader for de aldrede prøveobjektene.

Det er interessant at forskjellen i ledningsevnen i mellom de aldrede og ualdrede utvikler seg til å bli minimal ved å innføre fuktighet. Det gjør det vanskelig å skille mellom tørr aldret, fuktig aldret og fuktig ualdret feltstyrrende krympestrømpe ved måling.

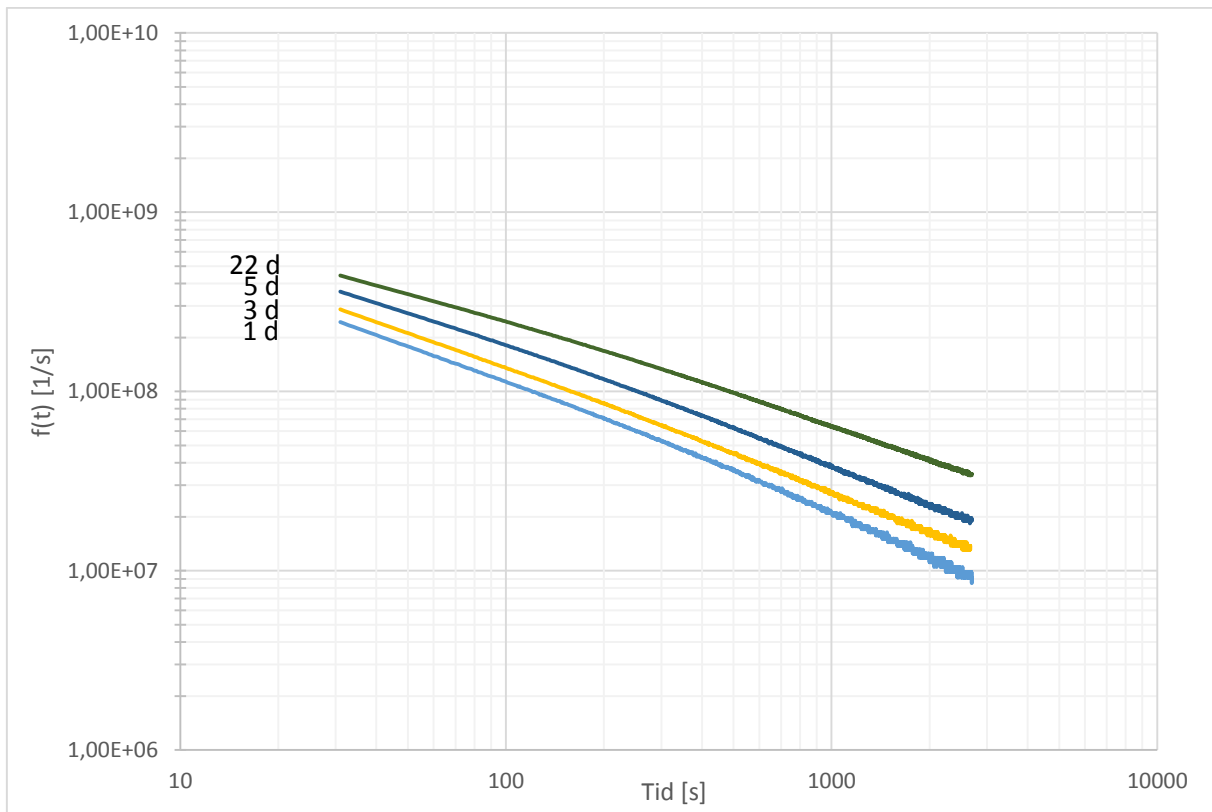


Figur 30: Tidsutviklingen av ledningsevnen ved 90 °C og 85 % RH, og 0,01 kV/mm.

Figur 31 og Figur 32 viser tidsutviklingen av den dielektriske responsfunksjonen $f(t)$ for henholdsvis ualdret og aldret prøveobjekt (OBJ 1 og 4) ved 0,01 kV/mm (se vedlegg A3 for grafer med flere $f(t)$ i samme plott og grafene til resterende prøveobjekt ved 0,01 og 0,05 kV/mm). $f(t)$ for de aldrede og ualdrede prøveobjektene er relativt like med tanke på størrelsesordenen etter rundt 10 døgn. Responsfunksjonen for de ualdrede prøveobjektene synker som funksjon av økende fuktighetsopptak, mens den øker med hensyn på fuktopptak for de aldrede. I begge tilfellene så går kurven mot en flatere struktur (mindre stigningstall) med hensyn på det økende fuktopptaket. Responsfunksjonen for de aldrede prøveobjektene holder en høyere verdi over tid ved at stigningstallet er lavere og i tillegg så krummer kurven motsatt vei enn for de ualdrede prøveobjektene.

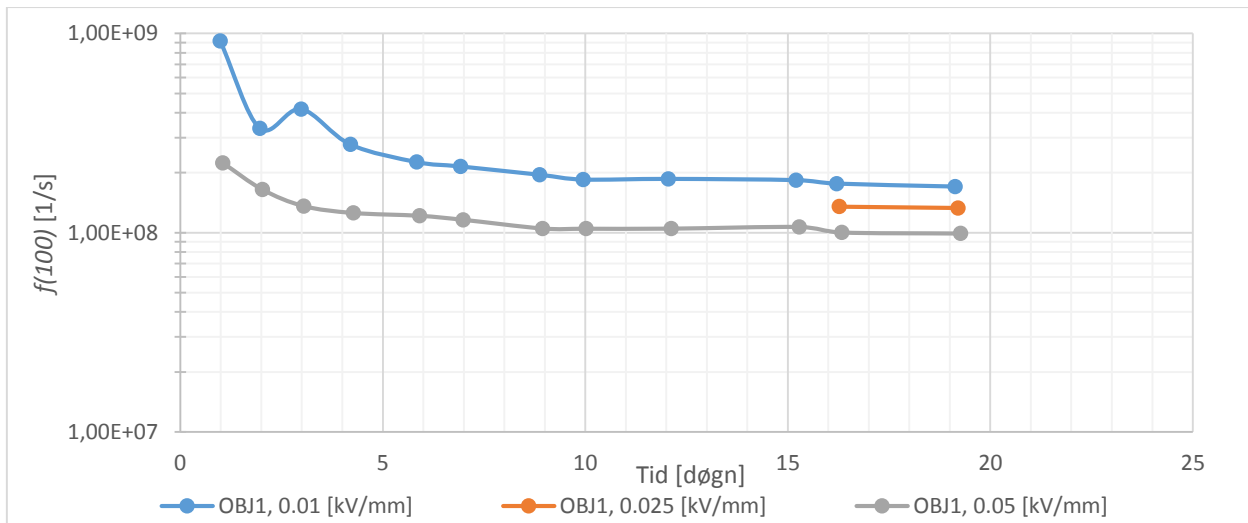


Figur 31: Log-log-plott av dielektriske responsfunksjoner ved 0.01 kV/mm for ualdret prøveobjekt [OBJ1]. Ved temperatur og relativ fuktighet på henholdsvis 90 °C og 85 %. Antall døgn etter påsatt fuktighet er markert i grafen.

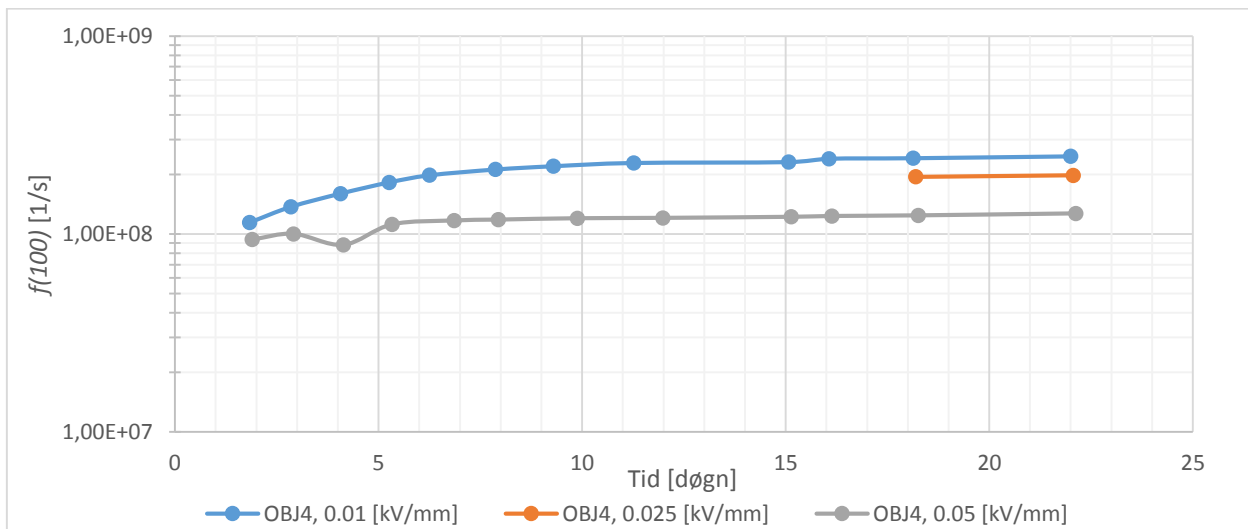


Figur 32: Log-log-plott av dielektriske responsfunksjoner ved 0.01 kV/mm for aldret prøveobjekt [OBJ4]. Ved temperatur og relativ fuktighet på henholdsvis 90 °C og 85 %. Antall døgn etter påsatt fuktighet er markert i grafen.

Figur 33 og Figur 34 viser tidsutviklingen av den dielektriske responsfunksjonen med hensyn på økende fuktighetsopptak ved tiden $t = 100$ for henholdsvis ualdret og ualdret prøveobjekt (OBJ 1 og 4), ved 0,01, 0,025 og 0,05 kV/mm (kurver for alle prøveobjekt vises i vedlegg A4). Som observert i Figur 31 og Figur 32 synker $f(100)$ som funksjon av økende fuktighetsopptak for de ualdrede prøveobjektene mens den øker som funksjon av økende fuktighetsopptak for de aldrede prøveobjektene. Likt for både aldret og ualdret er at det observeres en svak omvendt spenningsavhengighet. For lineære materialer så skal $f(t)$ være sammenfallende uansett spenningsnivå. Det høyeste elektriske feltet benyttet (0,05 kV/mm) er relativt lavt og det forventes en liten/ingen feltavhengighet. Forskjellen mellom 0,01, 0,025 og 0,05 kV/mm er liten og materialet kan anses som lineært ved disse spenningene. En mulig årsak er at den marginalt høyere spenningen påvirker trege ladningsbærere i større grad, som beveger seg frem og tilbake innad i materialet, mellom elektrodene og ikke registreres av Megger. For alle prøveobjektene så ser det ut til at $f(100)$ stabiliserer seg etter 10 dager, og det er liten forskjell mellom de aldrede og ualdrede, men de aldrede har en minimalt høyere verdi. $f(100)$ har en økning fra tørr (Figur 27) til våt tilstand ved 90 °C for ualdret og aldret prøveobjekt med henholdsvis en faktor på 10 og et sted mellom 2-5.



Figur 33: Tidsutviklingen av den dielektrisk responsfunksjon ved tiden $t = 100$ som funksjon av elektrisk felt, ved $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ og 85% relativ luftfuktighet for ualdret prøveobjekt [OBJ1].



Figur 34: Tidsutviklingen av den dielektrisk responsfunksjon ved tiden $t = 100$ som funksjon av elektrisk felt, ved $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ og 85% relativ luftfuktighet for aldret prøveobjekt [OBJ4].

5. Konklusjon

Fra arbeidet kan følgende konklusjoner trekkes:

- Den ualdrede feltstyrende krympestrømpen har et fuktighetsopptak på rundt 1 % etter ca. ett døgn i vannbad som holder 90 °C og har et vannopptak på 11 % etter 240 dager. Det er foreløpig ingen tegn til metning og det kan konstateres at vannopptaket ikke er fickisk (type 1).
- De aldrede fuktighetsopptaksmålingene viser også ett opptak på rundt 1 % etter ca. ett døgn ved en temperatur på 90 °C og relativ luftfuktighet på 85 %. Fuktopptaket øker videre med ca. halv hastighet sammenlignet med fuktighetsopptaksmålingene for ualdret materialet i vannbad.
- De ualdrede fuktighetsopptaksmålingene ved 85 % luftfuktighet (90 °C) viser massetap under oppfukting. Prøvene tar opp fuktighet, men det virker som det diffunderer stoff ut fra prøvene som resulterer i en netto vektreduksjon.
- Ledningsevnen til den feltstyrende krympestrømpen øker med over 1 dekadere for de aldrede sammenlignet med de ualdrede i tørr tilstand ved 30 og 90 °C.
- For både aldrede og ualdrede prøver resulterer temperaturøkningen fra 30 til 90 °C i en økning i ledningsevnen på ca. 2 dekadere.
- Ledningsevnen for aldrede og ualdrede prøveobjekt økte når de ble utsatt for fuktighet. Over tid sank ledningsevnen som funksjon av det økende fuktighetsopptaket, men ledningsevnen forble høyere enn ved tørr tilstand og etter 5-17 dager stabiliserte den seg som funksjon av fuktigheten. For de ualdrede prøveobjektene resulterte fuktopptaket i at ledningsevnen økte ytterligere med ca. 2 dekadere fra tørr tilstand ved 90 °C. Dette gir da en økning av ledningsevnen på hele 4 dekadere fra tørr tilstand ved 30 °C til fuktig tilstand ved 90 °C. Ledningsevnen til de aldrede prøveobjektene var mindre påvirket av fuktigheten, fra tørr til fuktig tilstand ved 90 °C observeres det en økning med en faktor på 2-3.
- Når ledningsevnen til alle prøveobjektene etter hvert hadde stabilisert seg som funksjon av fuktigheten, er forskjellen i ledningsevnen mellom tørr aldret, fuktig aldret og fuktig ualdret er svært liten, og det vil være vanskelig å skille de fra hverandre.
- Den dielektriske responsfunksjonen for ualdrede prøver synker ved økende fuktighetsinnhold mens for de aldrede prøvene øker den. For både aldret og ualdret får responsfunksjonen et lavere stigningstall ved økt fuktighet. Ved å sammenligne $f(100)$ for tørt ualdret prøveobjekt ved 30 °C opp mot aldret og fuktig prøveobjekt ved 90 °C, ble det observert en økning for den aldrede med en faktor på 35.

6. Videre arbeid

- Prøveobjektene står fortsatt i klimaskapet ved 90 °C og 85 % RH. Det bør utføres flere dielektriske responsmålinger over tid da fuktighetsinnholdet har økt ytterligere for å undersøke om ledningsevnen virkelig er stabil, eller som det skjer en videre utvikling.
- Utføre vannopptaksmålinger for både prøvene i fuktig luft og i vann for å se på fuktighetsopptakets utvikling og oppnå fullstendig vannopptakskurve for materialet (prøvene står fortsatt til oppfukning).
- For å undersøke massetapet ved fuktopptaket bør tørrvekten for både aldrede og ualdrede prøveobjekter veies før og etter en oppfuktning over 30 døgn for å sammenligne masseendringen.
- Ved slutføring av de dielektriske responsmålingene, kan prøveobjektene dissekteres og studeres nærmere ved hjelp av mikroskop, strekkprøving, DSC og OIT-målinger

7. Kilder

1. Hashemi, W.F.S.a.J., *Foundation of materials science and engineering*. 5 ed. 2011: McGraw-hill.
2. Hammervoll, K.D., *Ikke-desktruktiv tilstandskontroll av kabelskjøter i distribusjonsnett*, in *Energi og miljø*. 2010, NTNU.
3. Ildstad, E., *TET4160, High Voltage Insulation Materials*. 2014, Trondheim: Akademika forlag.
4. Farahani, M., H. Borsi, and E. Gockenbach. *Calculation and measurement of dielectric response function in insulation systems of high voltage rotating machines*. in *Properties and Applications of Dielectric Materials, 2003. Proceedings of the 7th International Conference on*. 2003.
5. Stancu, C., P.V. Notinger, and L.V. Badicu. *Dielectric response function for nonhomogeneous insulations*. in *Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), 2011 Annual Report Conference on*. 2011.
6. Erling, I., *TET 4195 High voltage Equipment – Cable Technology*.
7. *Jointmask master electricals*. power cable joints & cable accessories]. Available from: <http://www.calcuttayellowpages.com/adver/107046heat-shrinkable-joint.html>.
8. Christen, T., L. Donzel, and F. Greuter, *Nonlinear resistive electric field grading part 1: Theory and simulation*. *Electrical Insulation Magazine, IEEE*, 2010. **26**(6): p. 47-59.
9. Donzel, L., F. Greuter, and T. Christen, *Nonlinear resistive electric field grading Part 2: Materials and applications*. *Electrical Insulation Magazine, IEEE*, 2011. **27**(2): p. 18-29.
10. Mårtensson, E., *Modelling electrical properties of composite materials* in *Department of Electrical Engineering 2003*, Kungl Tekniska Högskolan.
11. Tyco Electronics Energy Division, *Power Cable Accessories*, E. Division, Editor. 2003/2004, Tyco Electronics Raychem GmbH.
12. Bruce Duncan, J.U., and Simon Roberts, *Review of Measurement and Modelling of Permeation and Diffusion in Polymers*. NPL report DEPCMPR, 2005.
13. Sanden, M.-L., *Condition Assessment of Medium Voltage Cable Joints*, in *Department of Electric Power Engineering*. 2015, Norwegian University of Science and Technology. p. 164.
14. Springer, C.-H.S.a.G.S., *Moisture Absorption and Desorption of Composite Materials*, in *Department of Mechanical Engineering*. 1975, The University of Michigan.
15. *Fickian Diffusion*. 2002; Available from: <http://www.adhesivestoolkit.com/Docs/test/Environmental%20Conditioning%20and%20Testing%20-%20Fickian%20Diffusion.xtp>.
16. Meyer, H.K.H., *Development of Test Methods for a Combined DC Power and Fiber Optic Deep Water Subsea Cable*, in *Department of Electric Power Engineering*. 2015, Norwegian University of Science and Technology.
17. engineeringarchives. *Necking*. Available from: http://www.engineeringarchives.com/les_mom_necking.html.
18. Technologies, O.H., *Long term reliability of polymer cables at high temperature*. 1997.
19. Commission, I.E., *IEC 60811-1-1 Common test methods for insulating and sheathing materials of electric cables and optical cables* -. 2001-07, IEC.
20. *UMX2 Ultra-microbalance*. Available from: http://us.mt.com/us/en/home/phased_out_products/others/UMX2.html.

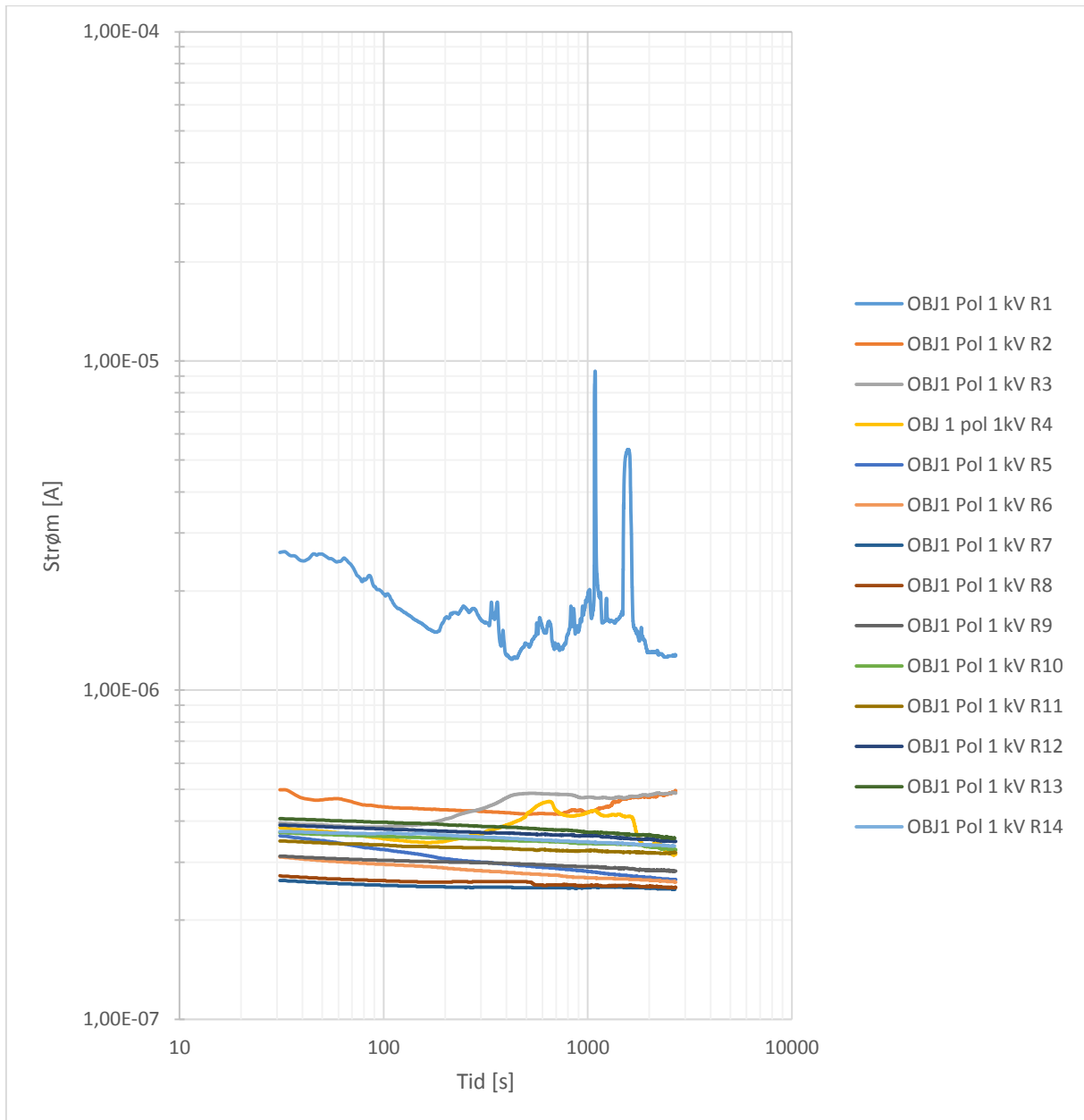
A. Vedlegg – Dielektrisk respons

A1. Polarisasjonsstrøm for OBJ1-4 ved 90 °C og 85 % RH

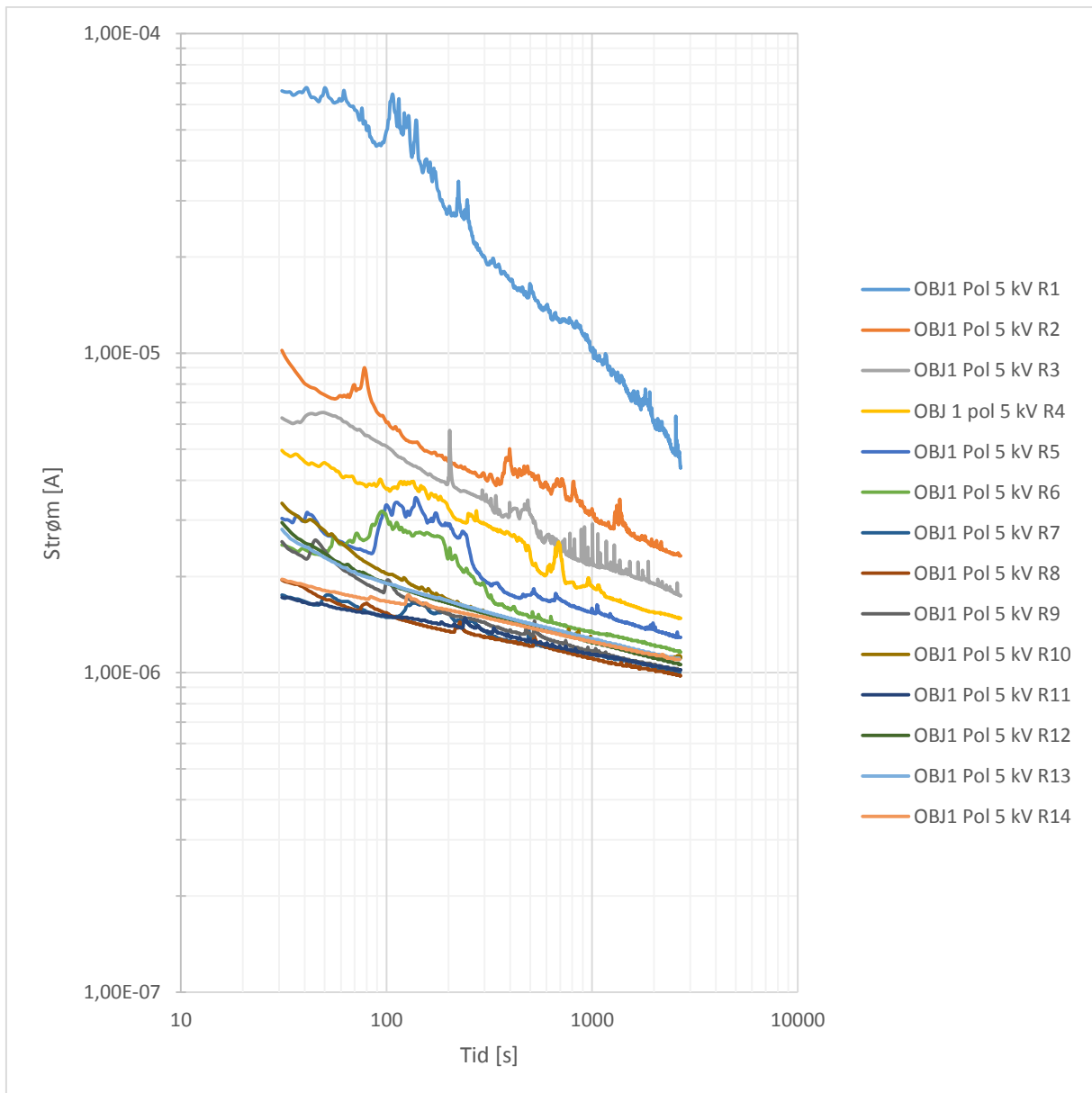
Tabell 5 viser en oversikt over hvor mange døgn med påsatt fuktighet markering R1-14 tilsier i Figur 35 til Figur 42. Figur 35 til Figur 42 viser tidsutviklingen av polarisasjonsstrømmen for OBJ1-4 ved 0,01 og 0,05 kV/mm ved 90 °C og 85 % RH.

Tabell 5: Oversikt over hvor mange dager med fuktighet markeringene «RX» tilsvarer. Hvor f.eks «R1 ≈ 1 d» står for «Runde 1 ≈ 1 døgn» som betyr 1 døgn etter påsatt fuktighet.

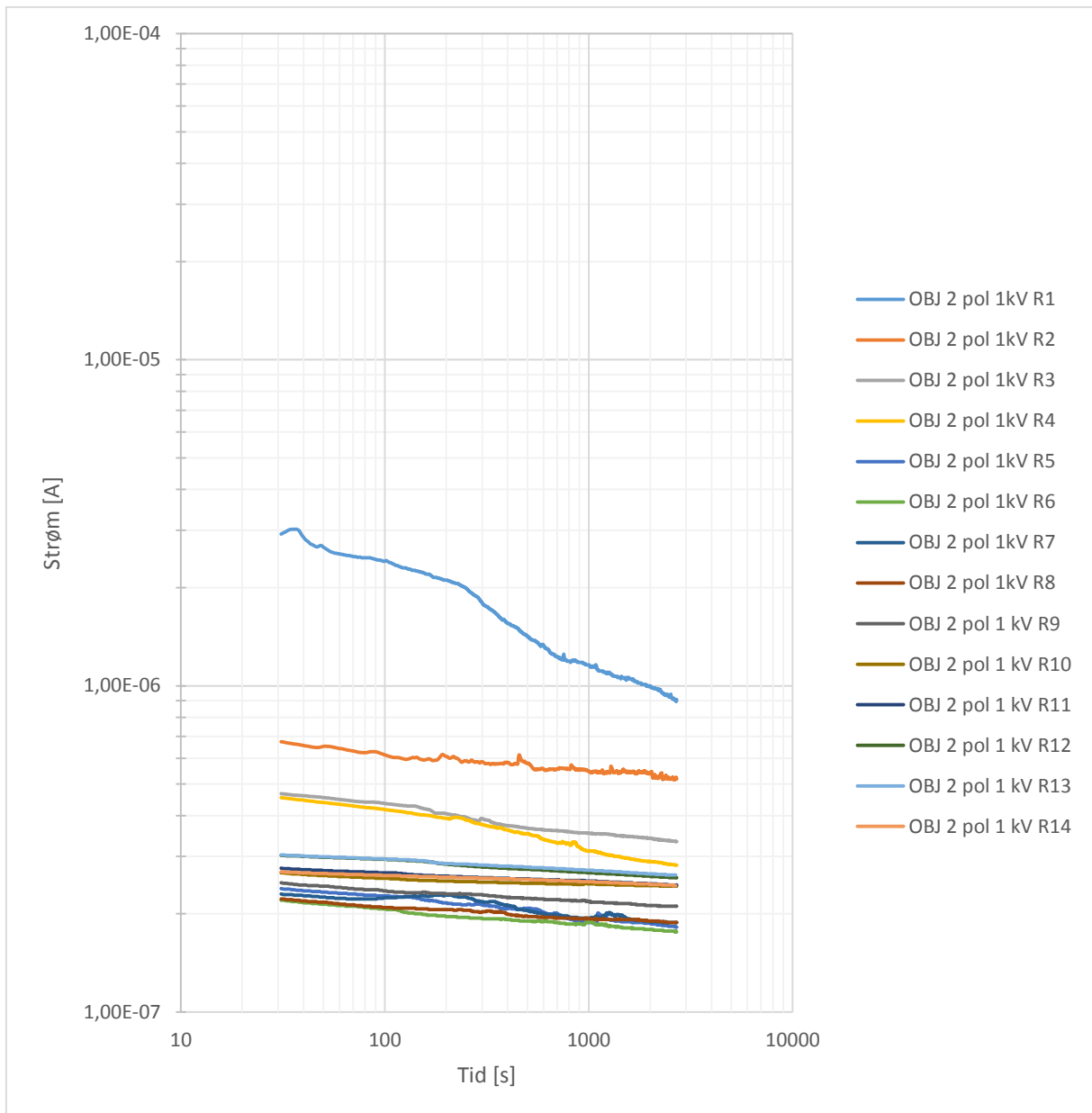
R1 ≈ 1 d	R2 ≈ 2 d	R3 ≈ 4 d	R4 ≈ 5 d	R5 ≈ 6 d	R6 ≈ 7 d	R7 ≈ 9 d
R8 ≈ 11 d	R9 ≈ 15 d	R10 ≈ 16 d	R11 ≈ 17 d	R12 ≈ 20 d	R13 ≈ 23 d	R14 ≈ 25 d



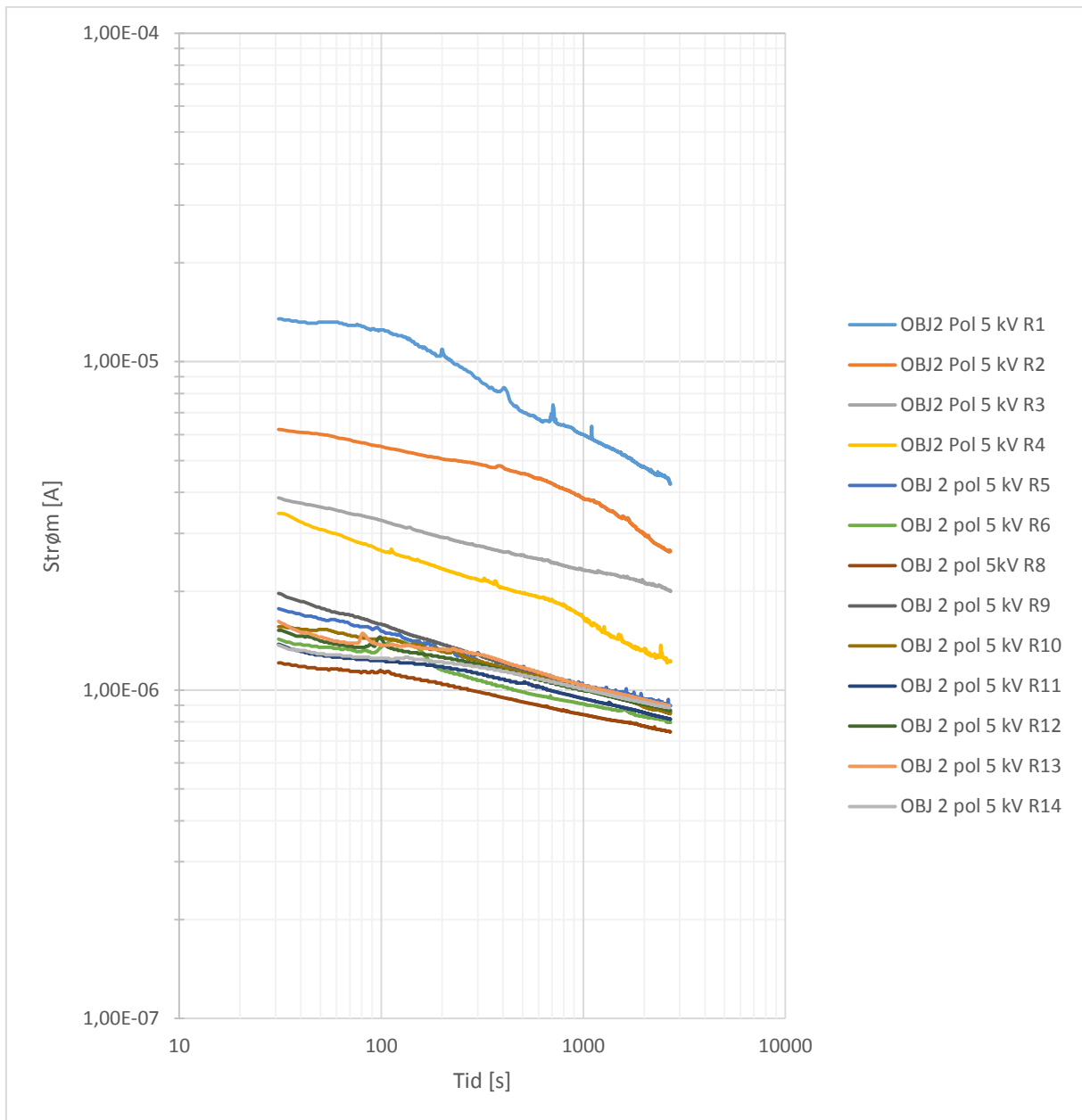
Figur 35: Log-log-plott av polarisasjonsstrømmen ved 0,01 kV/mm for ualdret prøveobjekt [OBJ1].



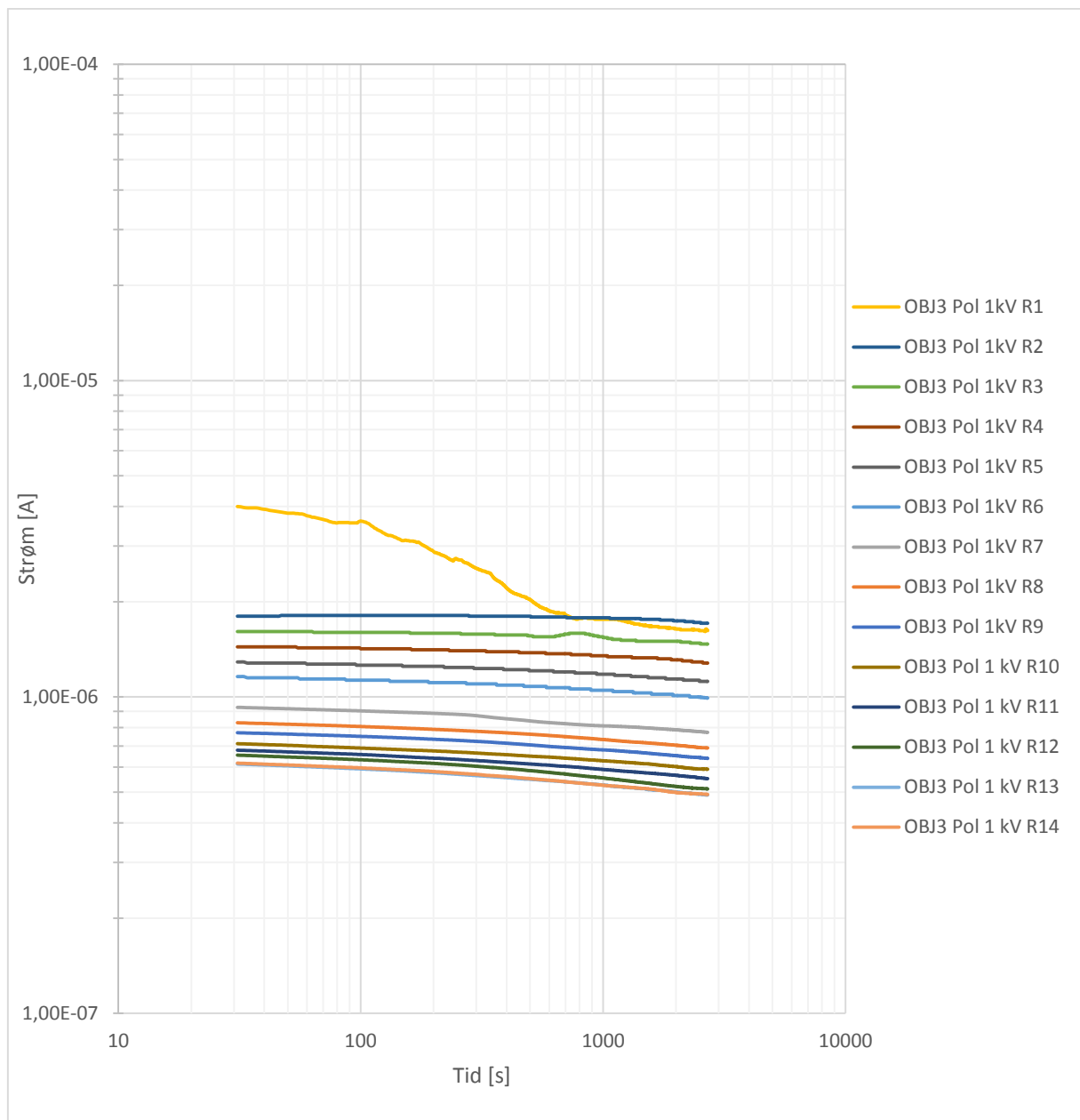
Figur 36: Log-log-plott av polarisasjonsstrømmen ved 0,05 kV/mm for ualdret prøveobjekt [OBJ1].



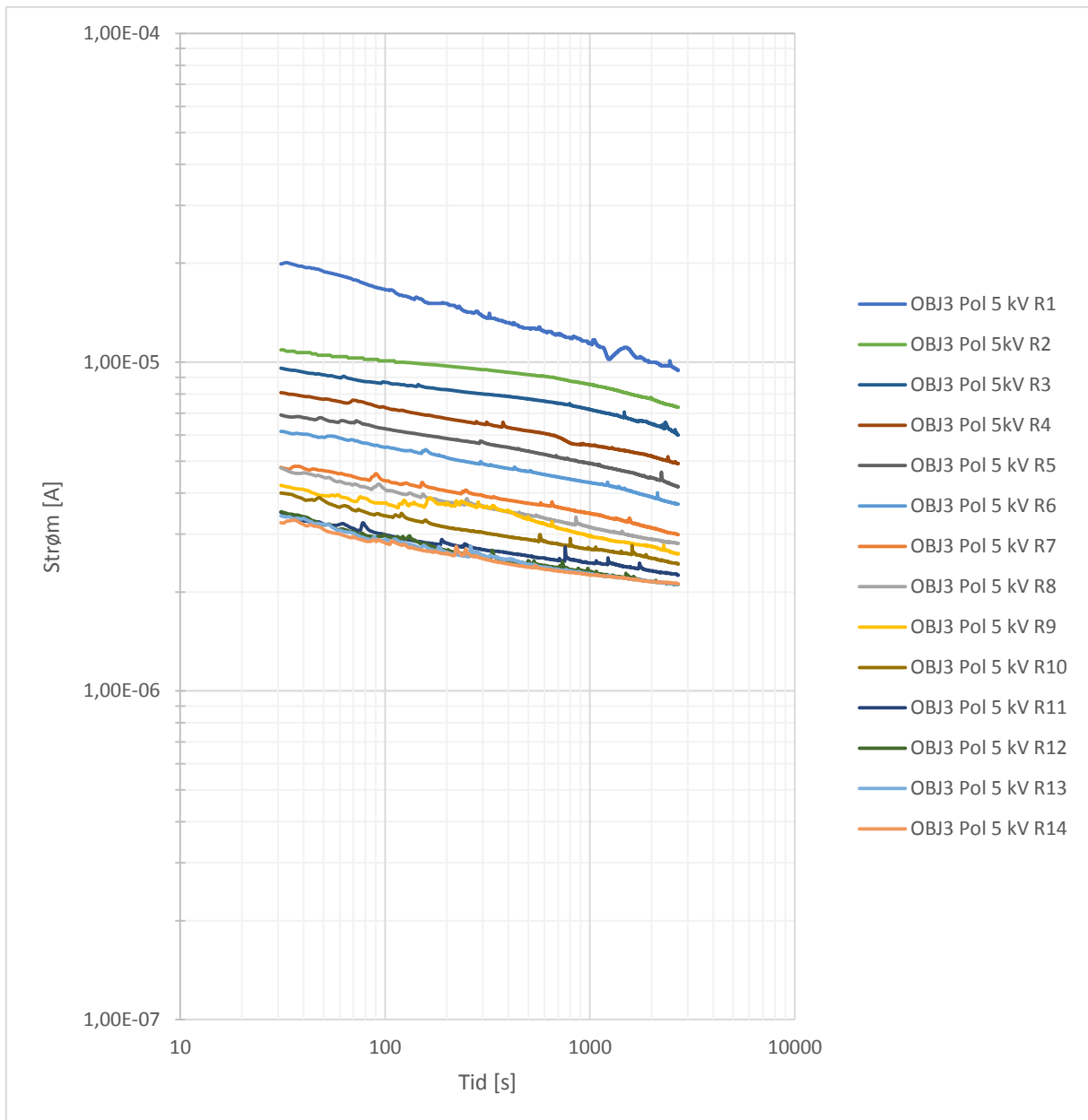
Figur 37: Log-log-plott av polarisasjonsstrømmen ved 0,01 kV/mm for ualdret prøveobjekt [OBJ2].



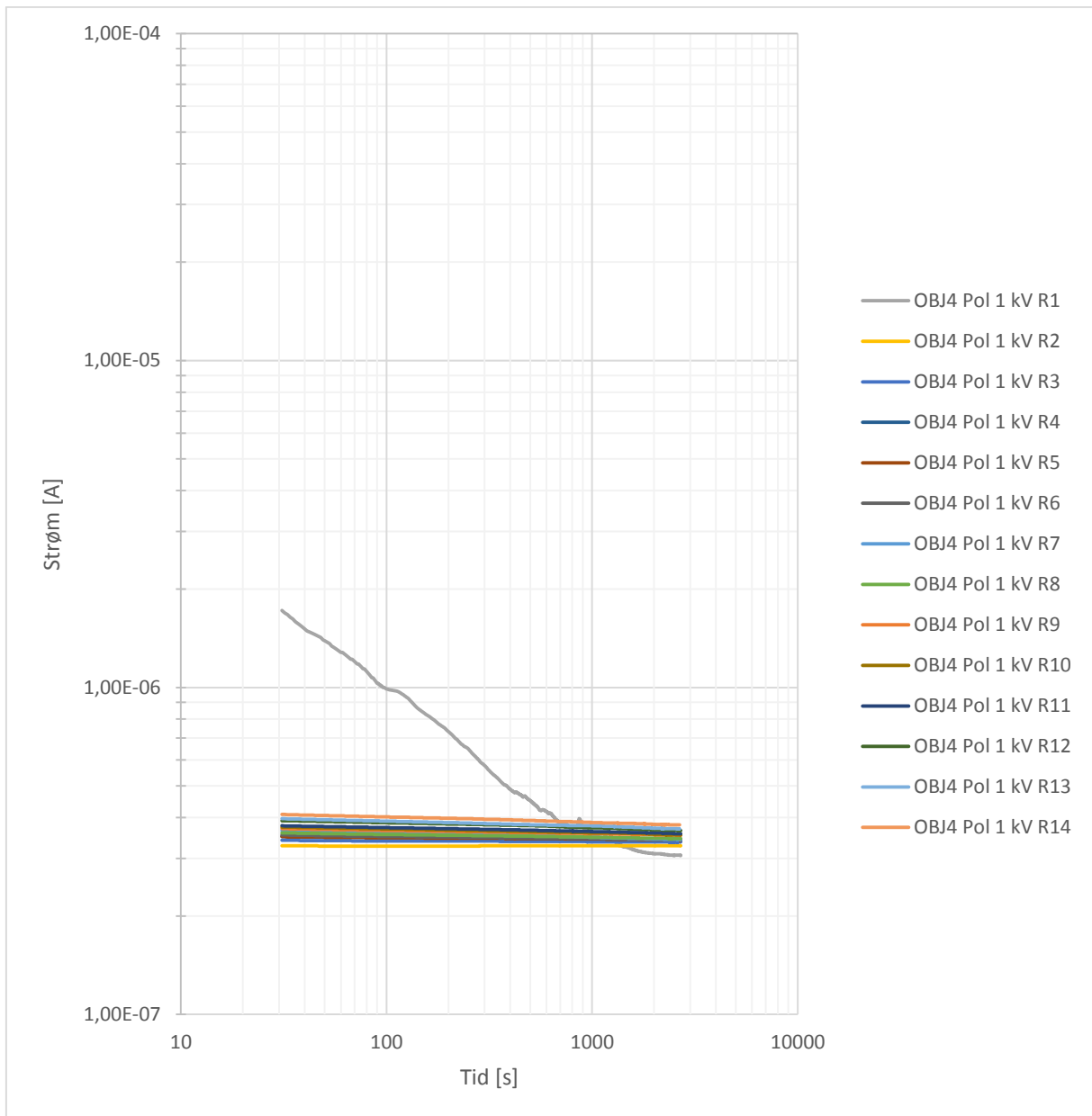
Figur 38: Log-log-plott av polarisasjonsstrømmen ved 0,05 kV/mm for ualdret prøveobjekt [OBJ2].



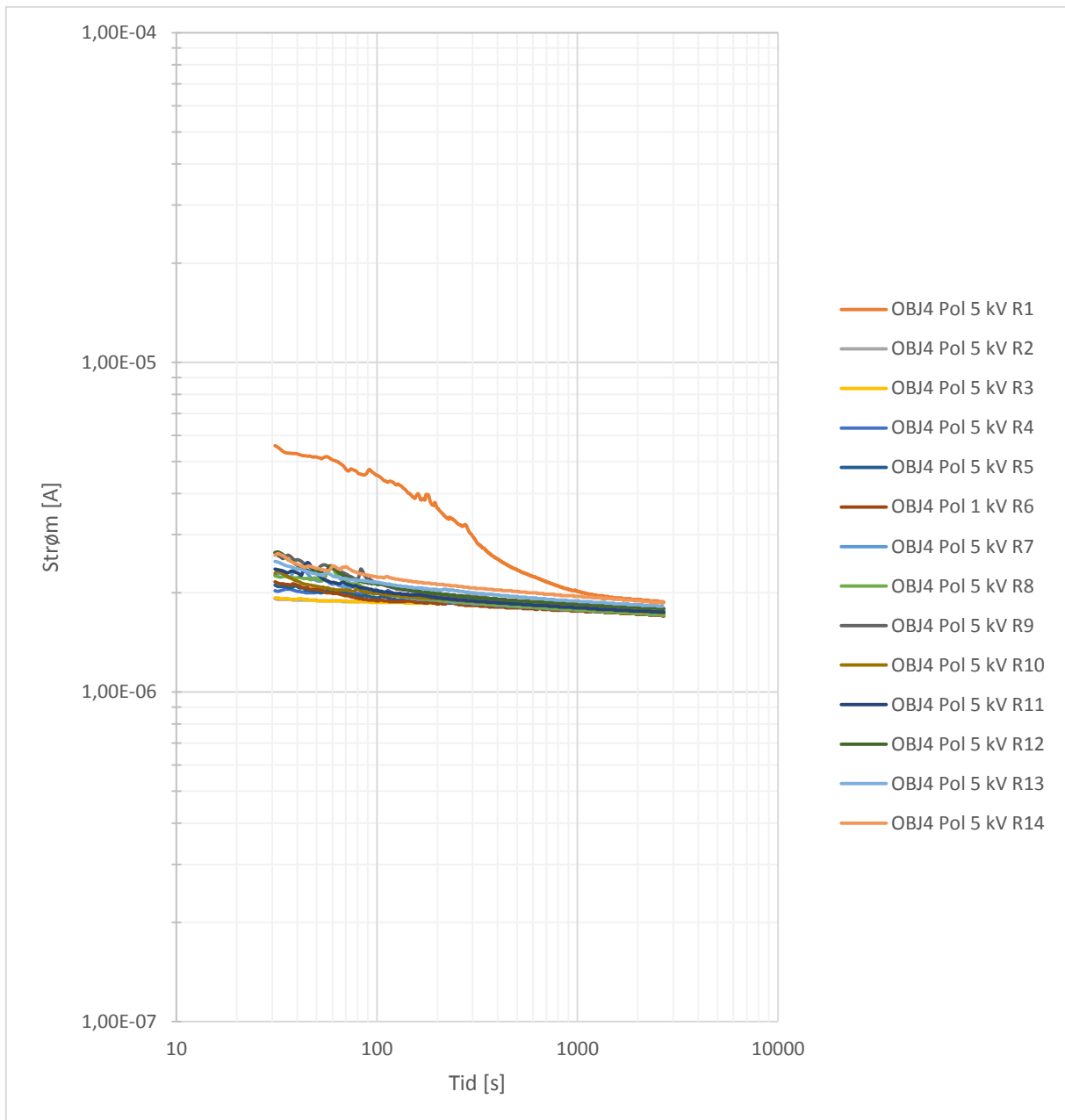
Figur 39: Log-log-plott av polarisasjonsstrømmen ved 0,01 kV/mm for ualdret prøveobjekt [OBJ3].



Figur 40: Log-log-plott av polarisasjonsstrømmen ved 0,05 kV/mm for ualdret prøveobjekt [OBJ3].



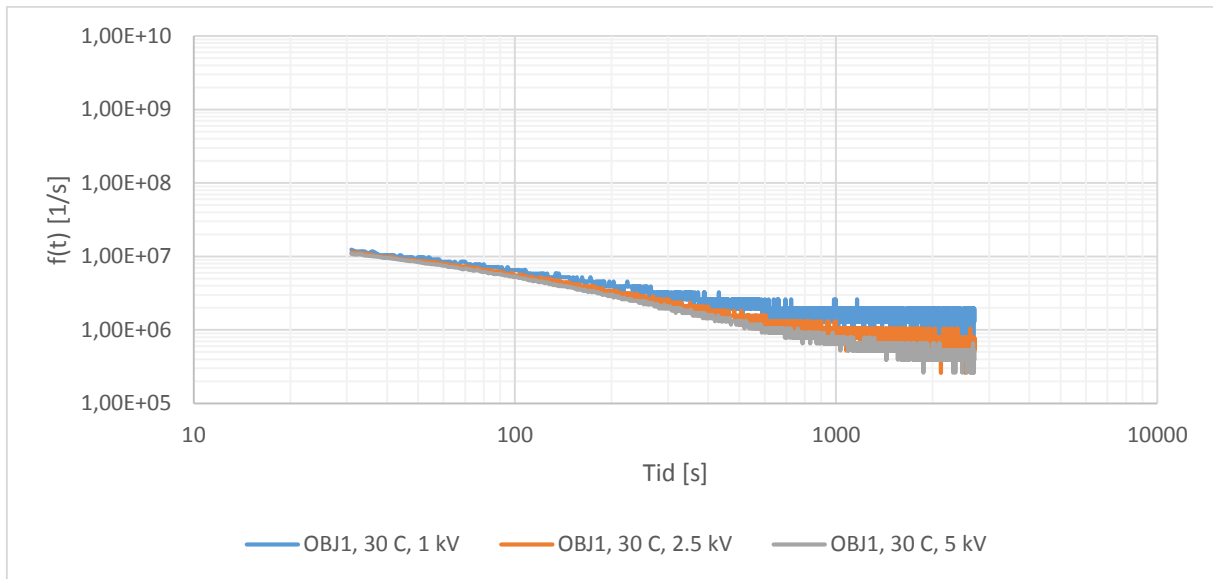
Figur 41: Log-log-plott av polarisasjonsstrømmen ved 0,01 kV/mm for ualdret prøveobjekt [OBJ4].



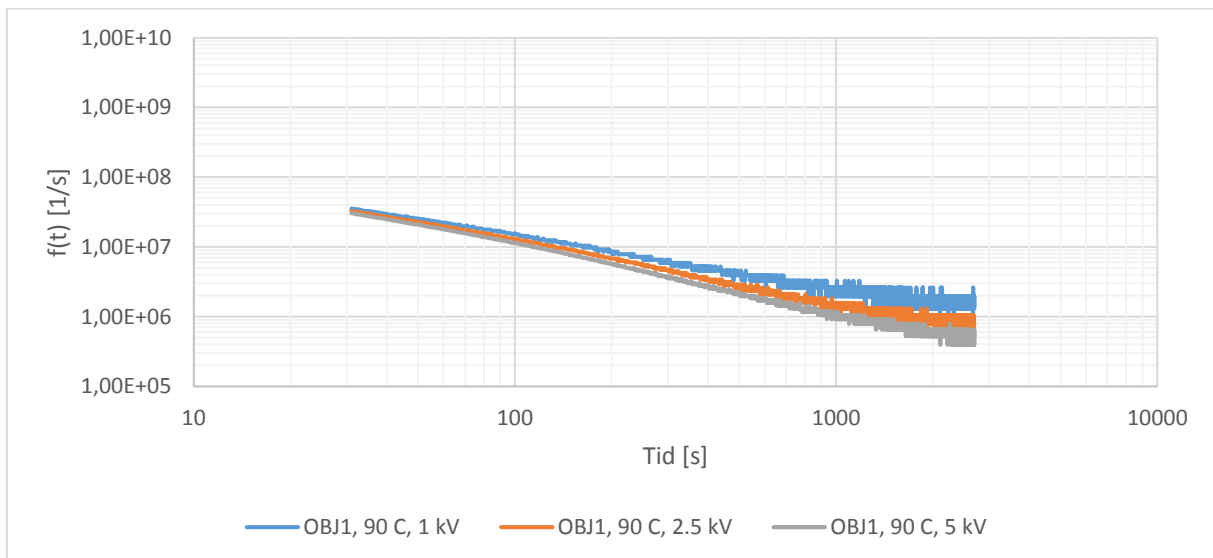
Figur 42: Log-log-plott av polarisasjonsstrømmen ved 0,05 kV/mm for ualdret prøveobjekt [OBJ4].

A2. Dielektrisk respons funksjoner for OBJ1-4 ved 30 og 90 °C, tørr tilstand

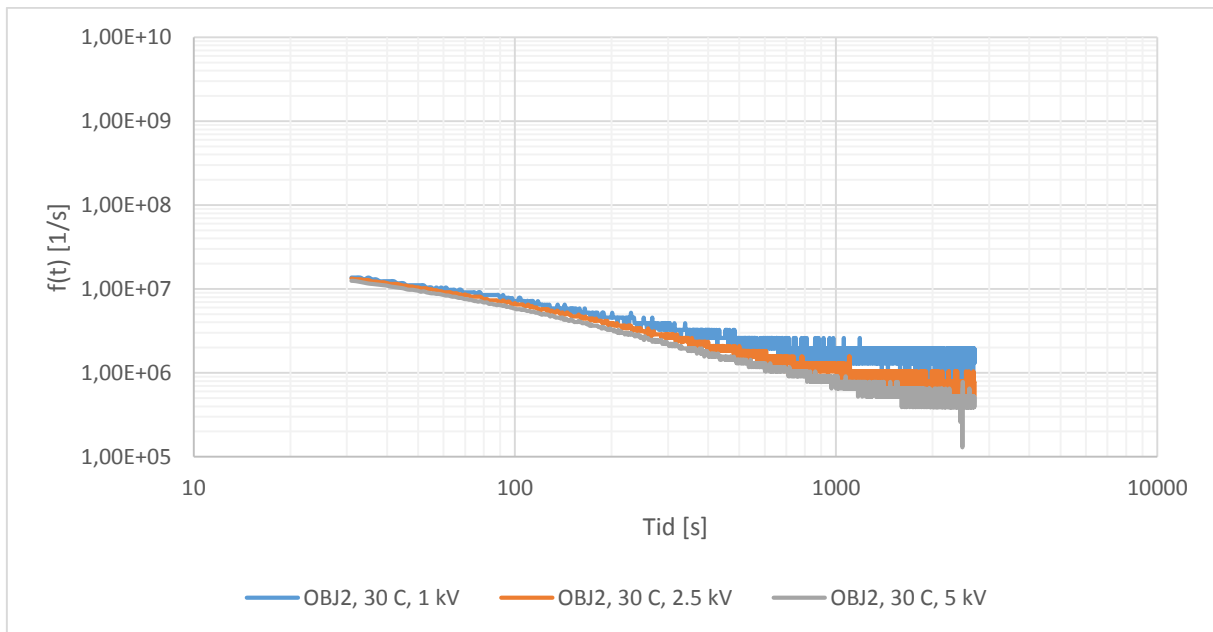
Figur 43 til Figur 50 viser $f(t)$ for OBJ1-4 ved 0,01, 0,025 og 0,05 kV/mm ved 30 og 90 °C i tørr tilstand.



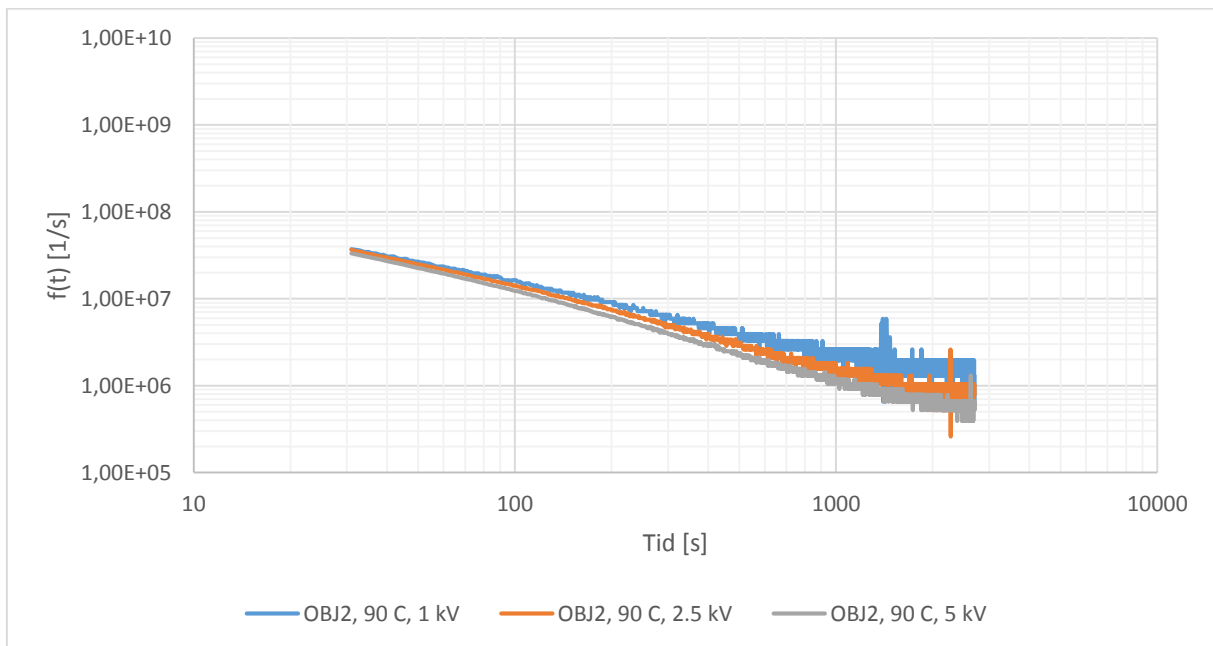
Figur 43: Log-log-plott av dielektrisk responsfunksjon ved 0,01, 0,025 og 0,05 kV/mm for ualdret prøveobjekt [OBJ1], ved 30 °C.



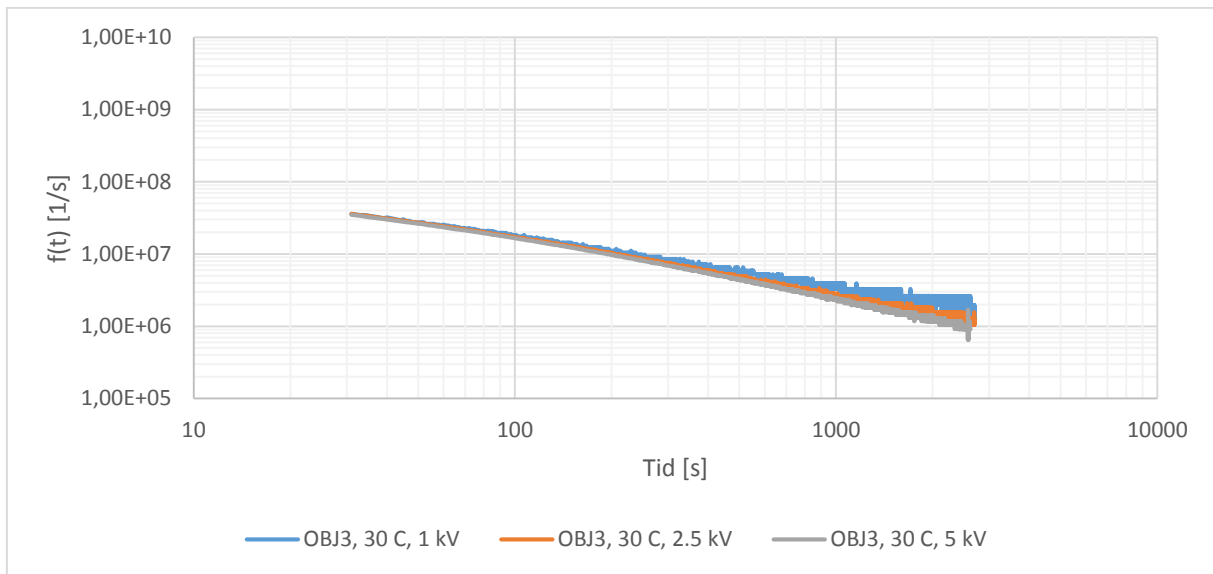
Figur 44: Log-log-plott av dielektrisk responsfunksjon ved 0,01, 0,025 og 0,05 kV/mm for ualdret prøveobjekt [OBJ1], ved 90 °C.



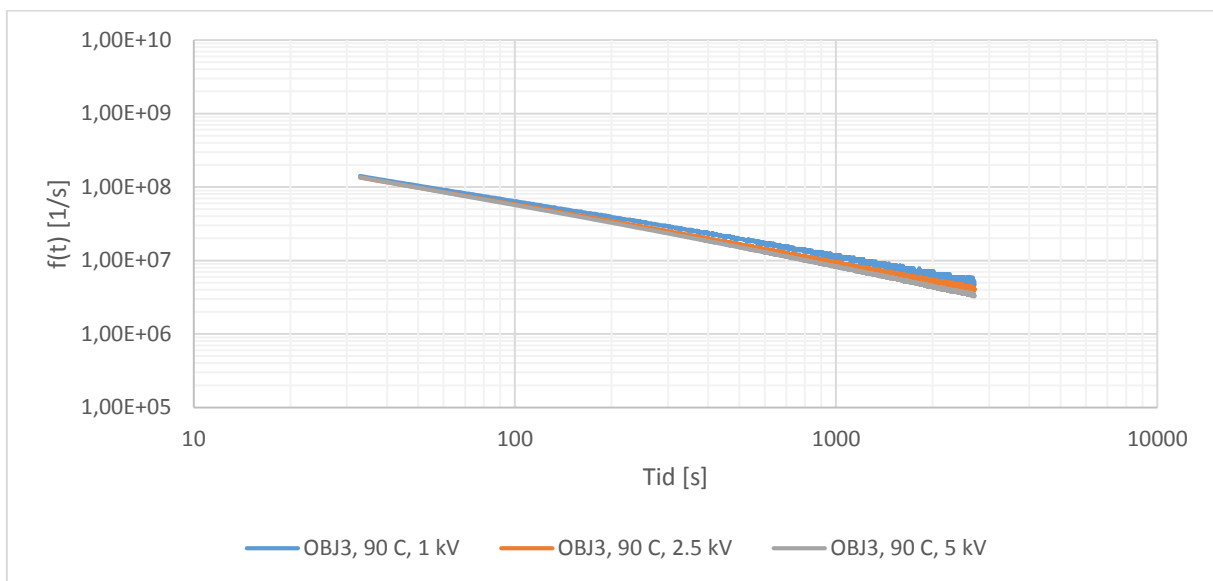
Figur 45: Log-log-plott av dielektrisk responsfunksjon ved 0,01, 0,025 og 0,05 kV/mm for ualdret prøveobjekt [OBJ2], ved 30 °C.



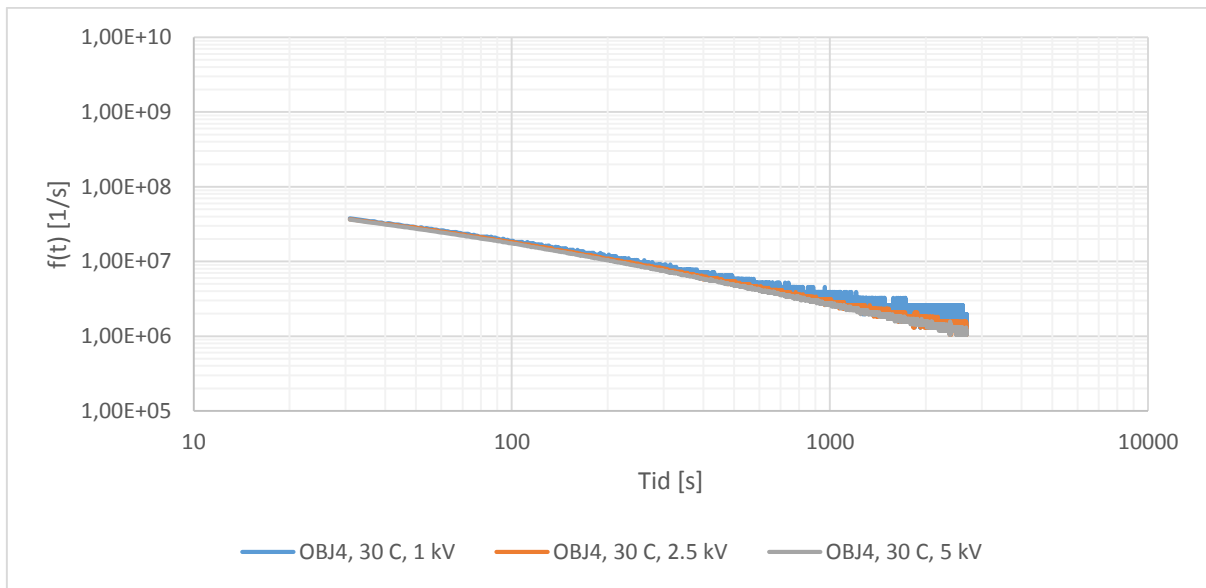
Figur 46: Log-log-plott av dielektrisk responsfunksjon ved 0,01, 0,025 og 0,05 kV/mm for ualdret prøveobjekt [OBJ2], ved 90 °C.



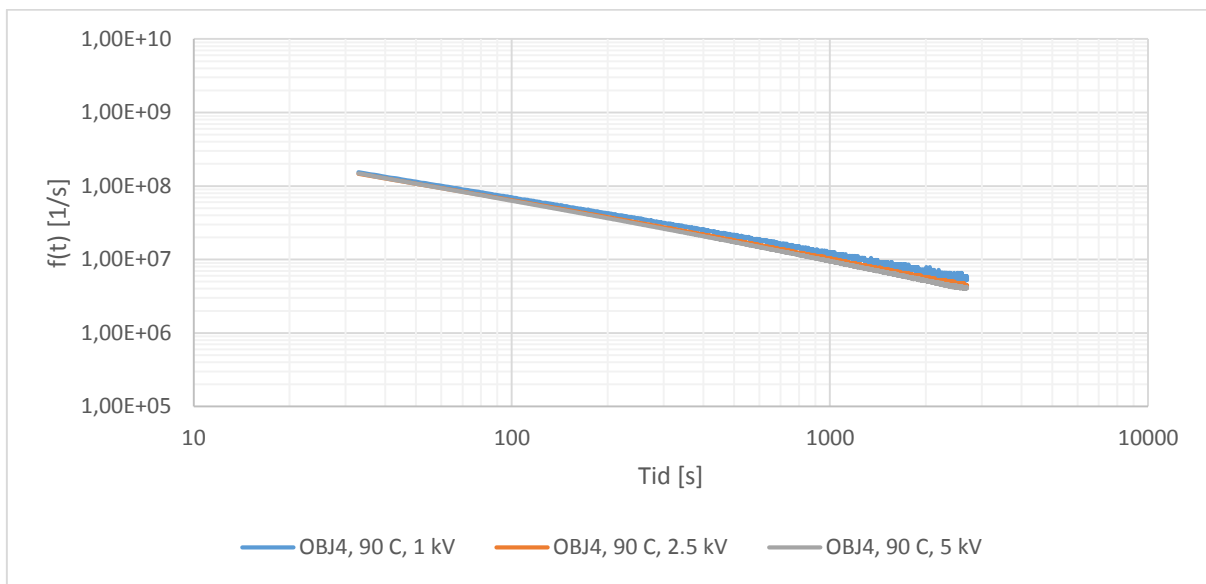
Figur 47: Log-log-plott av dielektrisk responsfunksjon ved 0,01, 0,025 og 0,05 kV/mm for ualdret prøveobjekt [OBJ3], ved 30 °C.



Figur 48: Log-log-plott av dielektrisk responsfunksjon ved 0,01, 0,025 og 0,05 kV/mm for ualdret prøveobjekt [OBJ3], ved 90 °C.



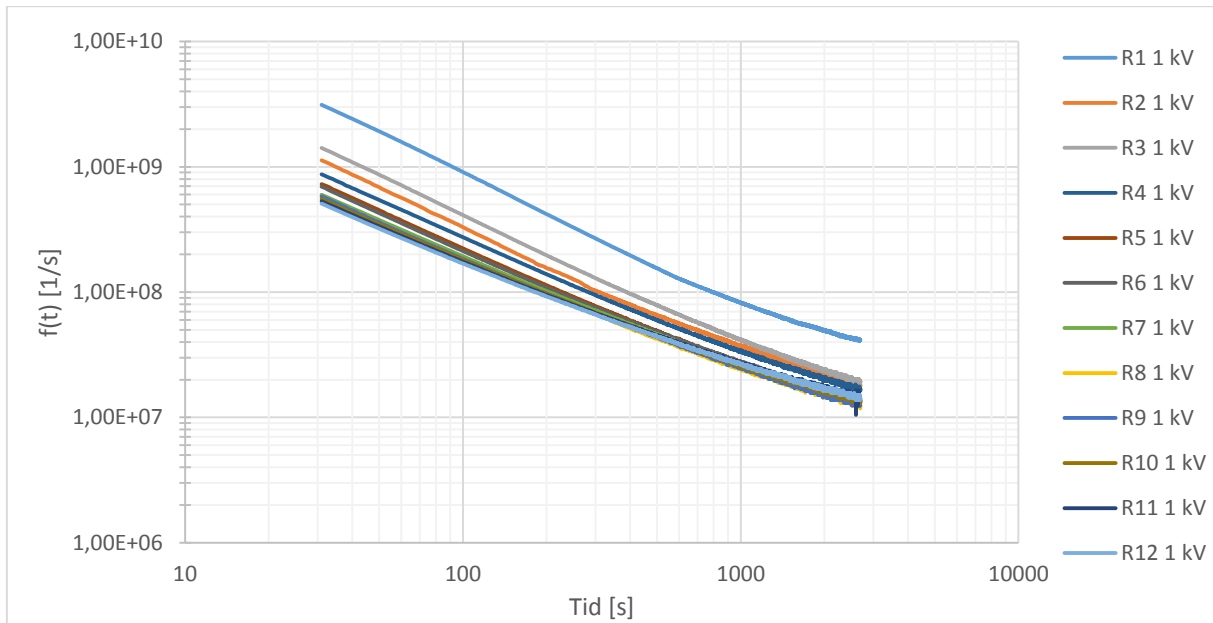
Figur 49: Log-log-plott av dielektrisk responsfunksjon ved 0,01, 0,025 og 0,05 kV/mm for ualdret prøveobjekt [OBJ4], ved 30 °C.



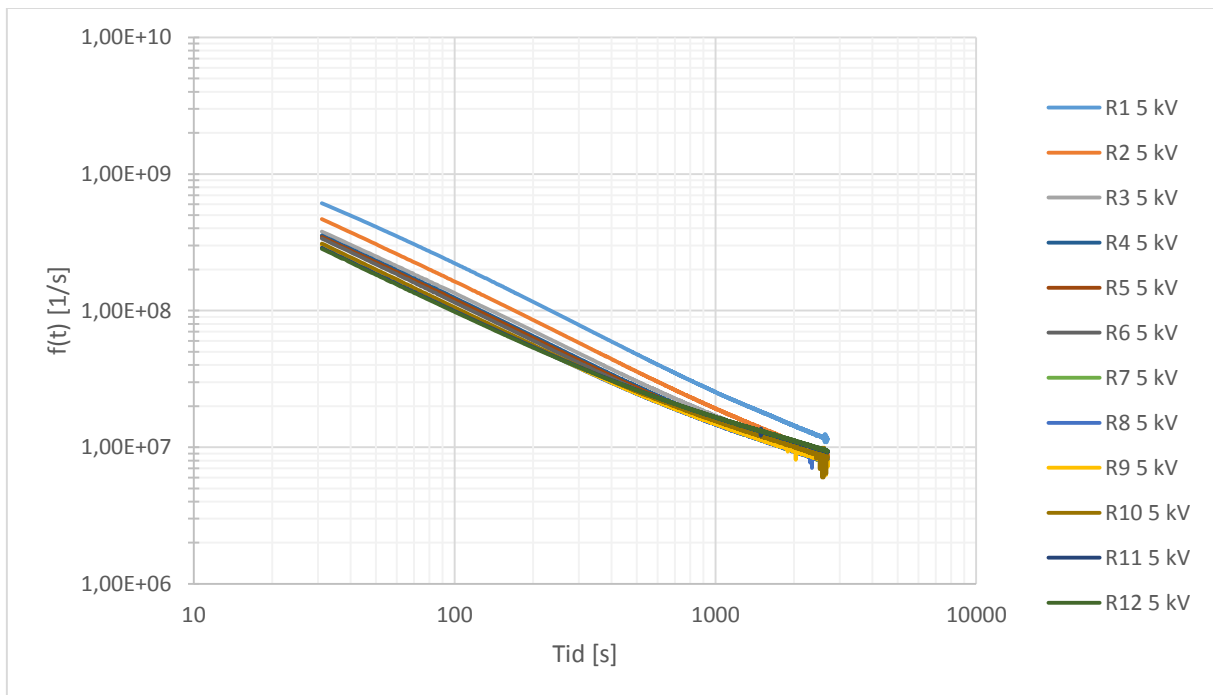
Figur 50: Log-log-plott av dielektrisk responsfunksjon ved 0,01, 0,025 og 0,05 kV/mm for ualdret prøveobjekt [OBJ4], ved 90 °C.

A3. Dielektrisk responsfunksjoner for OBJ1-4 ved 90 °C og 85 % RH

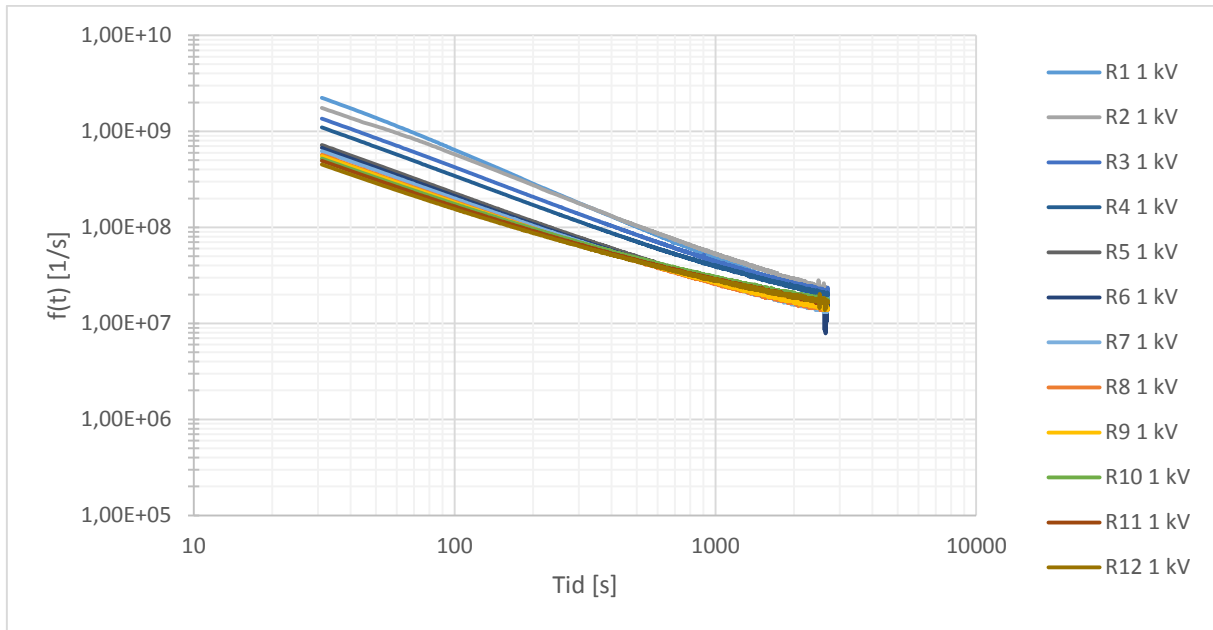
Figur 51 til Figur 58 viser tidsutviklingen til $f(t)$ for OBJ1-4 ved 0,01 og 0,05 kV/mm ved 90 °C og 85 % relativ luftfuktighet.



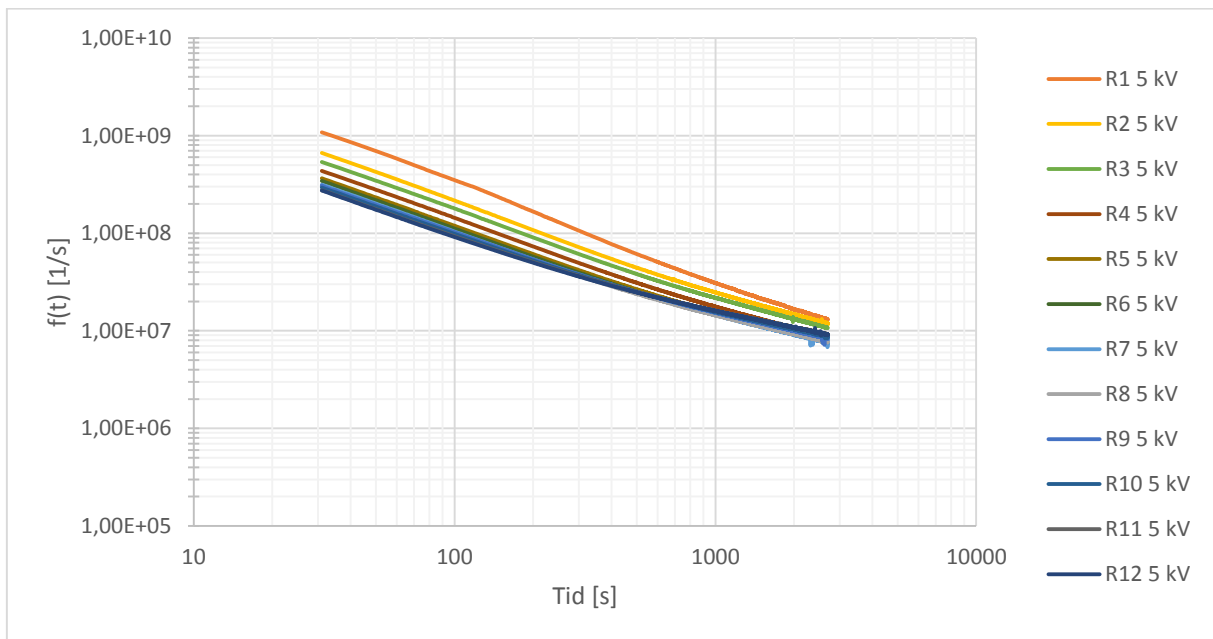
Figur 51: Log-log-plott av tidsutviklingen for dielektrisk responsfunksjonen ved 0,01 kV/mm for ualdret prøveobjekt [OBJ1], ved 90 °C og 85 % RH.



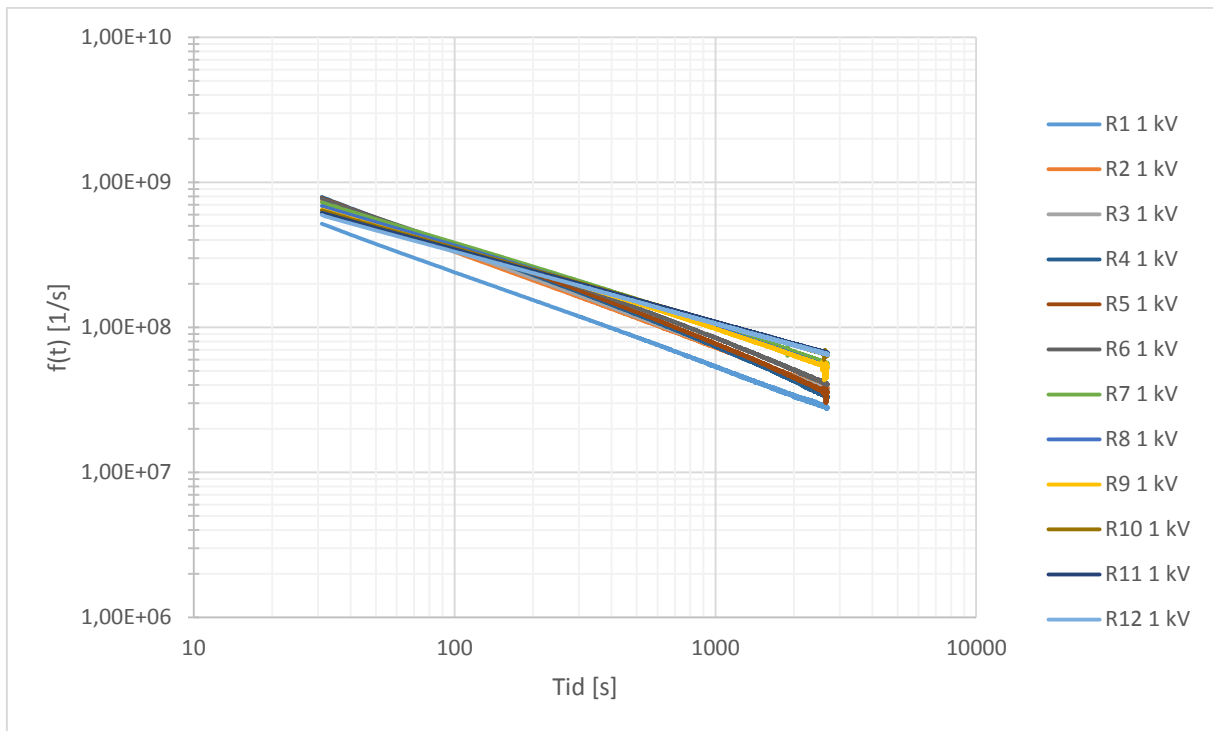
Figur 52: Log-log-plott av tidsutviklingen for dielektrisk responsfunksjonen ved 0,05 kV/mm for ualdret prøveobjekt [OBJ1], ved 90 °C og 85 % RH.



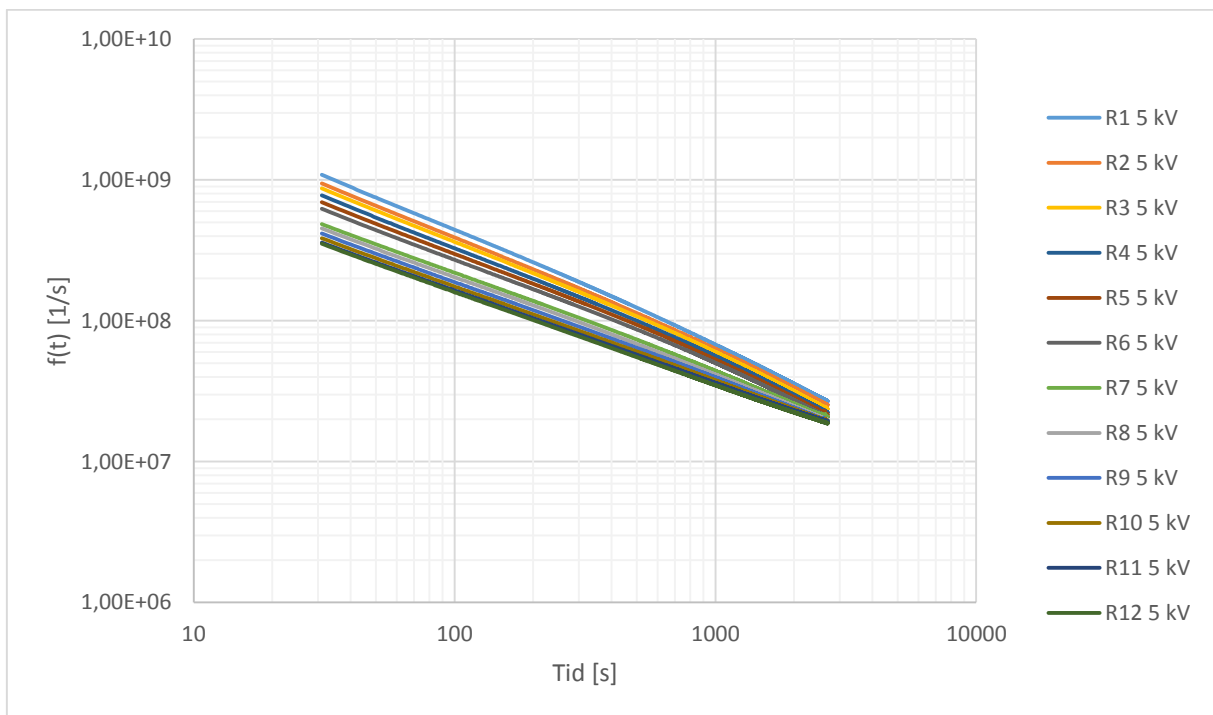
Figur 53: Log-log-plott av tidsutviklingen for dielektrisk responsfunksjonen ved 0,01 kV/mm for ualdret prøveobjekt [OBJ2], ved 90 °C og 85 % RH.



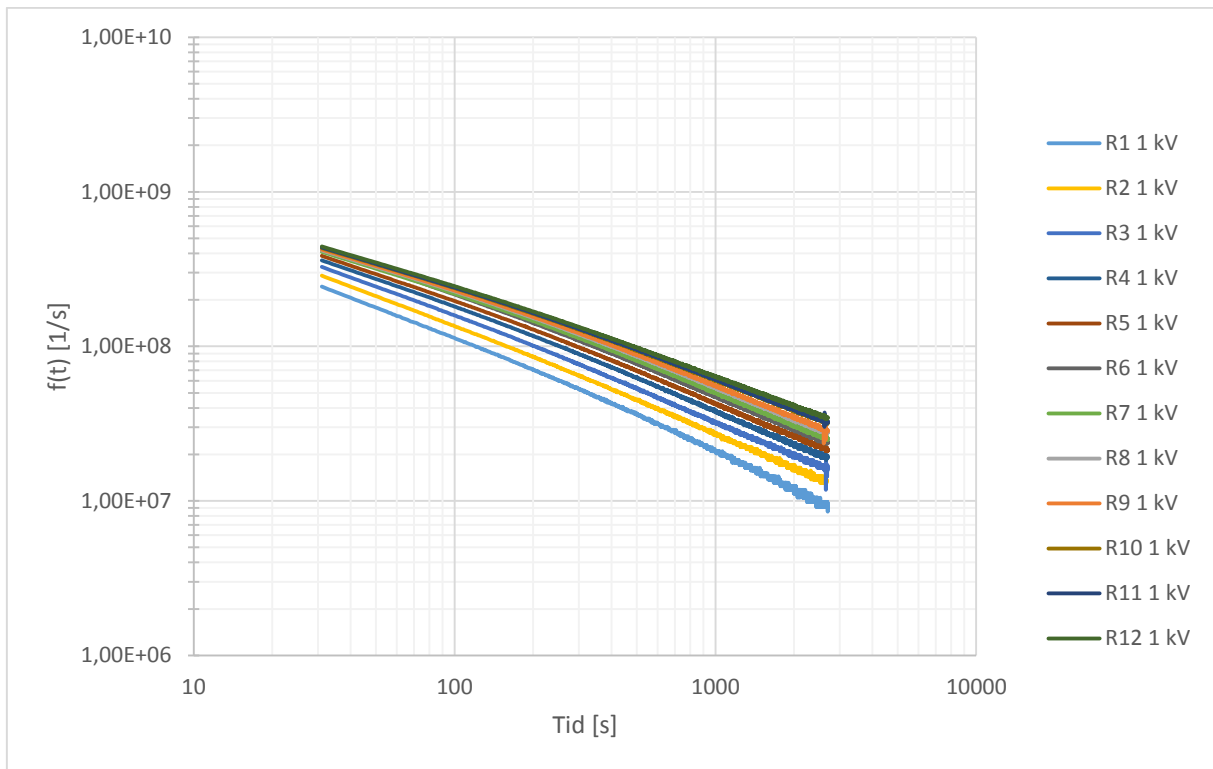
Figur 54: Log-log-plott av tidsutviklingen for dielektrisk responsfunksjonen ved 0,05 kV/mm for ualdret prøveobjekt [OBJ2], ved 90 °C og 85 % RH.



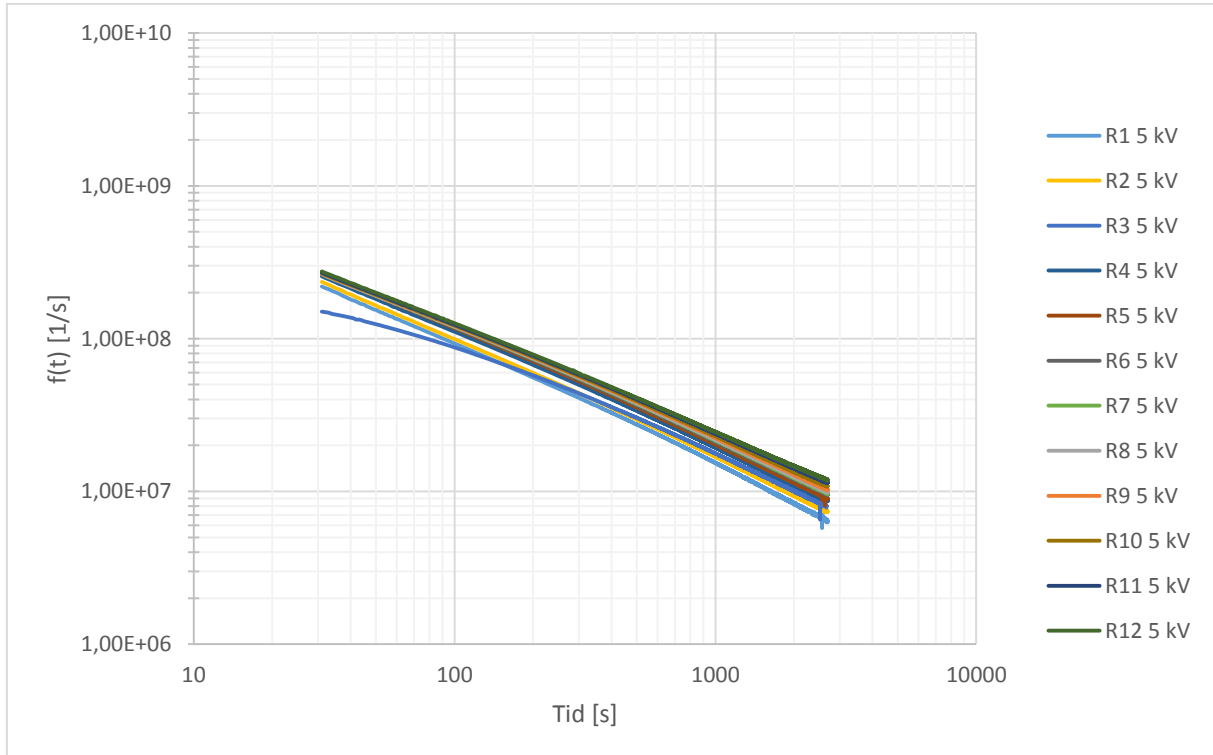
Figur 55: Log-log-plott av tidsutviklingen for dielektrisk responsfunksjonen ved 0,01 kV/mm for aldret prøveobjekt [OBJ3], ved 90 °C og 85 % RH.



Figur 56: Log-log-plott av tidsutviklingen for dielektrisk responsfunksjonen ved 0,05 kV/mm for aldret prøveobjekt [OBJ3], ved 90 °C og 85 % RH.



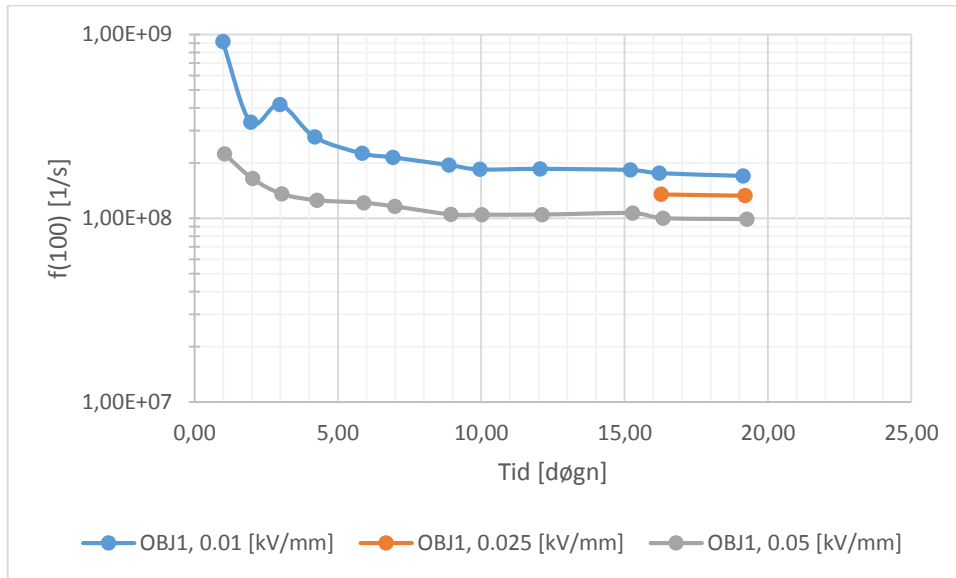
Figur 57: Log-log-plott av tidsutviklingen for dielektrisk responsfunksjonen ved 0,01 kV/mm for aldret prøveobjekt [OBJ4], ved 90 °C og 85 % RH.



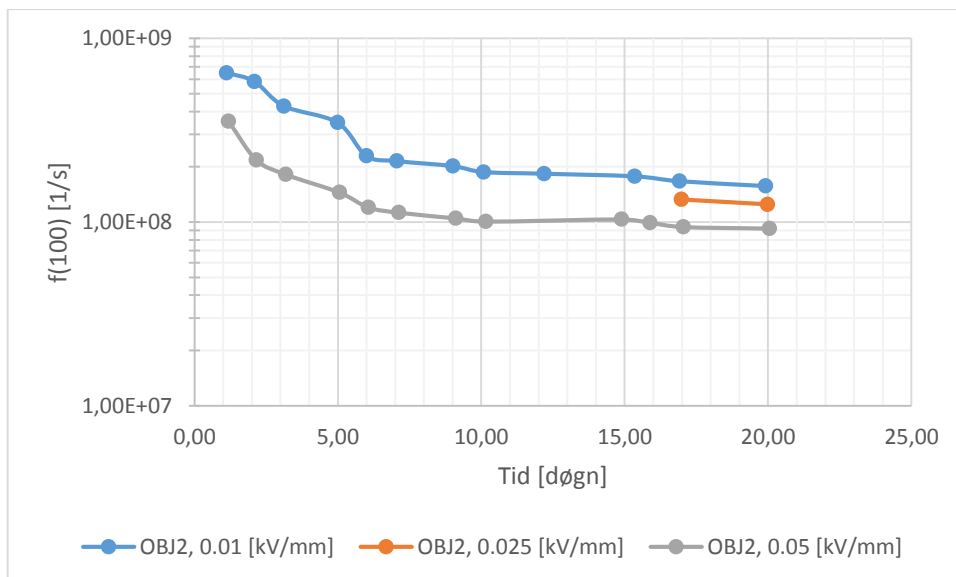
Figur 58: Log-log-plott av tidsutviklingen for dielektrisk responsfunksjonen ved 0,05 kV/mm for aldret prøveobjekt [OBJ4], ved 90 °C og 85 % RH.

A4. Tidsutviklingen til de dielektrisk responsfunksjonene ved $t = 100$

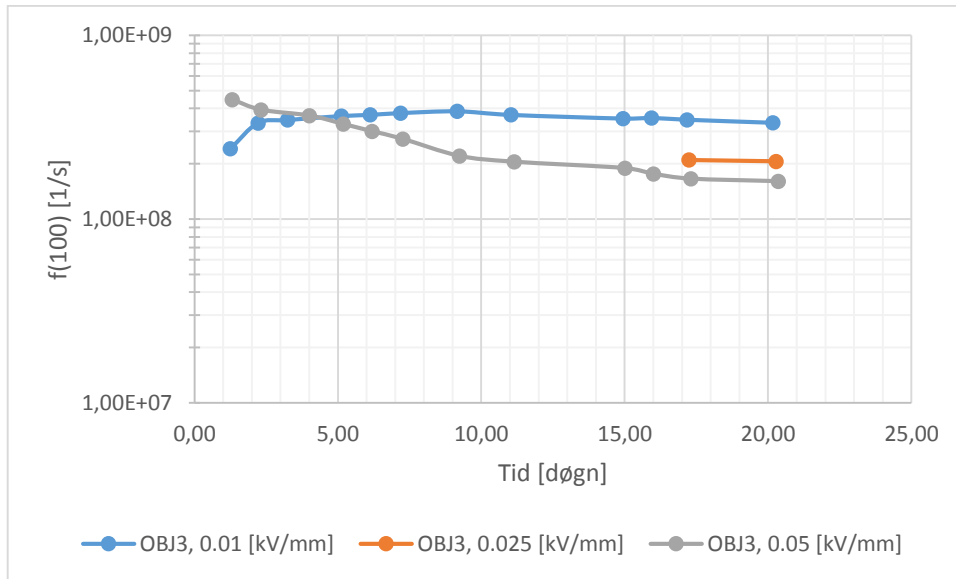
Figur 59 til Figur 62 viser tidsutviklingen til $f(100)$ for henholdsvis OBJ1-4 ved 0,01, 0,025 og 0,05 kV/mm ved 90 °C og 85 % relativ luftfuktighet.



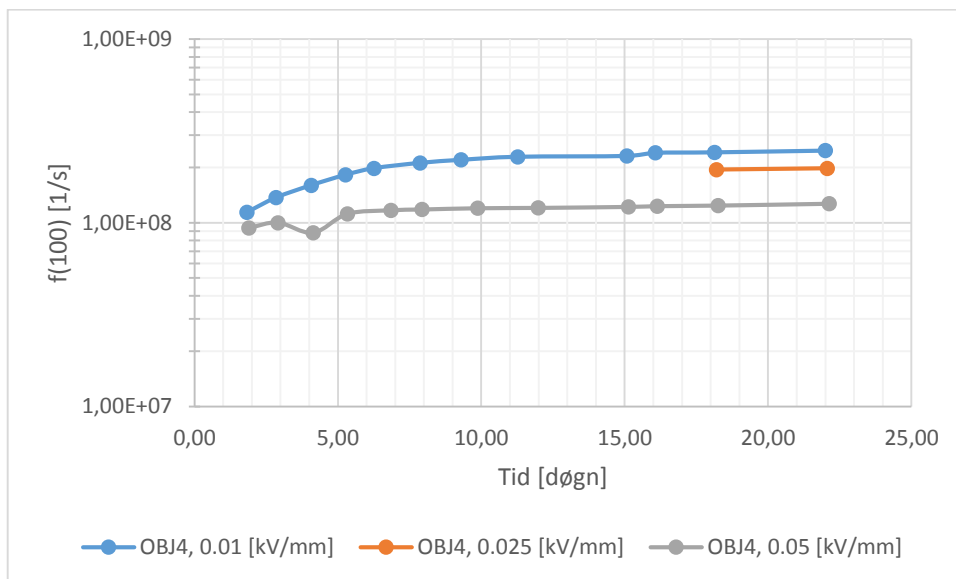
Figur 59: Tidsutviklingen av den dielektrisk responsfunksjon ved tiden $t = 100$ som funksjon av elektrisk felt, ved 90 °C og 85 % relativ luftfuktighet for ualdret prøveobjekt [OBJ1].



Figur 60: Tidsutviklingen av den dielektrisk responsfunksjon ved tiden $t = 100$ som funksjon av elektrisk felt, ved 90 °C og 85 % relativ luftfuktighet for ualdret prøveobjekt [OBJ2].



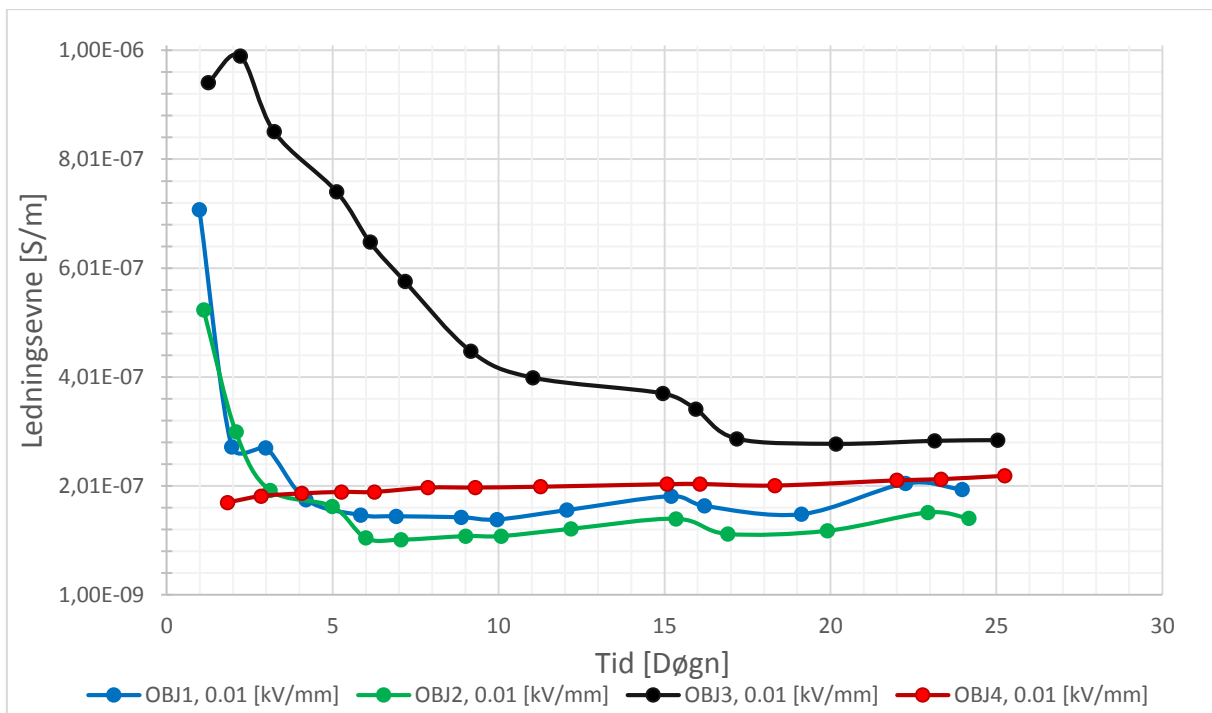
Figur 61: Tidsutviklingen av den dielektrisk responsfunksjon ved tiden $t = 100$ som funksjon av elektrisk felt, ved $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ og 85% relativ luftfuktighet for aldret prøveobjekt [OBJ3].



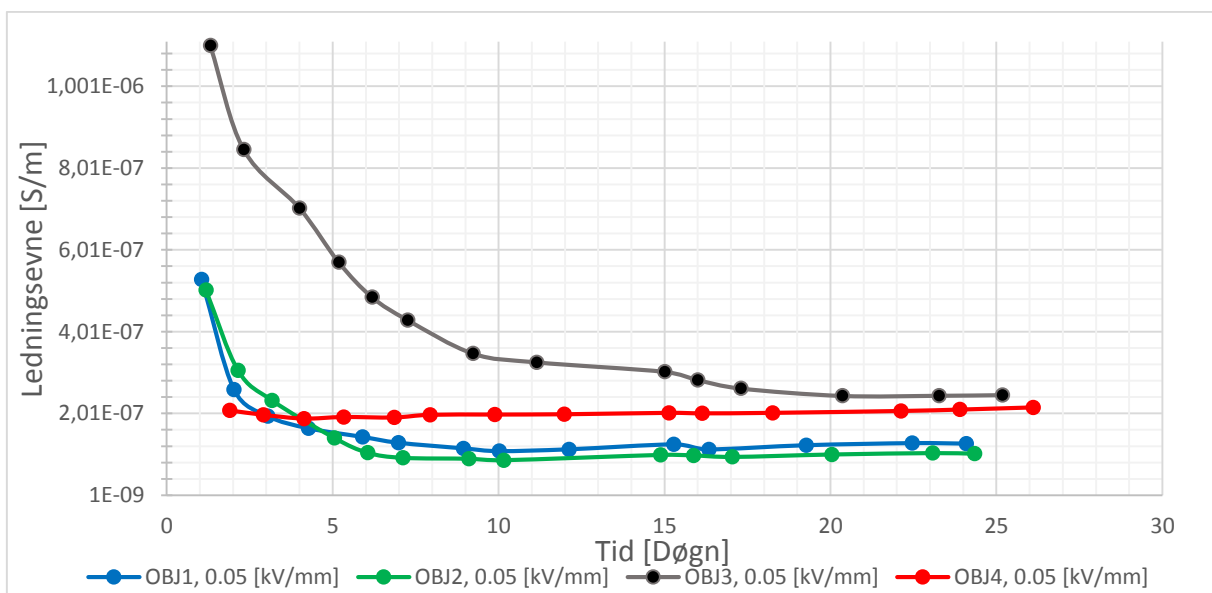
Figur 62: Tidsutviklingen av den dielektrisk responsfunksjon ved tiden $t = 100$ som funksjon av elektrisk felt, ved $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ og 85% relativ luftfuktighet for aldret prøveobjekt [OBJ4].

A5. Ledningsevne ved 90 °C og 85 % RH

Figur 63 og Figur 64 viser tidsutviklingen til ledningsevnen for henholdsvis 0,01 og 0,05 kV/mm for OBJ1-4 ved 90 °C og 85 % relativ luftfuktighet.



Figur 63: Tidsutviklingen av ledningsevnen ved 90 °C og 85 % RH, og 0,01 kV/mm.



Figur 64: Tidsutviklingen av ledningsevnen ved 90 °C og 85 % RH, og 0,05 kV/mm.

B. Fuktighetsopptakstabeller

B1. Fuktighetsopptak ualdret prøveobjekt ved 90 °C i vann

Tabell 6 til Tabell 11 viser resultatene for fuktighetsopptaksmålingene for ualdret prøveobjekt i vann ved 90 °C.

Tabell 6: Masseopptaksmåling for ualdret fuktighetsopptaksprøve #1 i vannbad ved 90 °C.

Prøve #1	Dato	Klokkeslett	Masse [mg]	Døgn	sqrt(t)	t [s]	C [-]	Vektendring [%]
Tørrvekt	29.09.2015	10:51:59	581,2	0	0	0	0	0
	29.09.2015	11:03:37	581,9	0,0081	26	698	0,0011	0,110
	29.09.2015	11:25:16	582,3	0,023	45	1997	0,0018	0,179
	29.09.2015	11:52:04	582,7	0,042	60	3605	0,0024	0,245
	29.09.2015	12:54:15	583,4	0,085	86	7336	0,0038	0,376
	29.09.2015	13:51:41	583,9	0,125	104	10782	0,0046	0,463
	29.09.2015	14:03:07	584,0	0,133	107	11468	0,0047	0,472
	30.09.2015	09:05:43	588,2	0,9	283	80024	0,0120	1,198
	30.09.2015	14:15:30	588,6	1,1	314	98611	0,0126	1,265
	01.10.2015	12:28:19	590,4	2,1	423	178580	0,0157	1,570
	02.10.2015	10:05:43	591,4	3	506	256424	0,0176	1,756
	05.10.2015	14:23:27	594,7	6	729	531088	0,0232	2,318
	08.10.2015	13:11:26	596,8	9	887	785967	0,0268	2,684
	13.10.2015	09:40:29	599,1	14	1098	1205310	0,0307	3,068
	20.10.2015	13:12:49	601,7	21	1350	1822850	0,0352	3,521
	06.11.2015	14:12:14	606,4	38	1815	3295215	0,0432	4,321
	18.11.2015	15:51:55	609,8	50	2083	4337996	0,0492	4,918
	18.12.2015	13:00:21	618,6	80	2631	6919702	0,0643	6,434
	11.01.2016	09:42:06	624,0	104	2997	8981407	0,0735	7,350
	26.01.2016	13:49:24	625,7	119	3208	10292245	0,0765	7,654
	03.02.2016	14:10:08	626,9	127	3314	10984689	0,0785	7,854
	08.02.2016	15:28:32	627,6	132	3380	11421393	0,0798	7,982
	19.02.2016	11:39:25	629,4	143	3515	12358046	0,0828	8,284
	03.03.2016	09:57:16	631,4	156	3671	13475117	0,0864	8,638
	17.03.2016	10:25:25	633,8	170	3832	14686406	0,0905	9,046
	08.04.2016	11:05:41	638,5	192	4073	16589622	0,0985	9,848
	29.04.2016	11:33:47	642,5	213	4290	18405708	0,1054	10,537
	12.05.2016	12:46:55	644,1	226	4420	19533296	0,1082	10,819
	26.05.2016	12:33:03	645,7	240	4554	20742064	0,1109	11,088

Tabell 7: Masseopptaksmåling for ualdret fuktighetsopptaksprøve #2 i vannbad ved 90 °C.

Prøve #2	Dato	Klokkeslett	Masse [mg]	Døgn	sqrt(t)	t [s]	C [-]	Vektendring [%]
Tørrvekt	29.09.2015	10:53:35	585,9	0,0	0	0	0,0000	0,000
	29.09.2015	11:06:12	586,5	0,0088	28	757	0,0011	0,106
	29.09.2015	11:27:28	586,9	0,024	45	2033	0,0017	0,174
	29.09.2015	11:54:03	587,3	0,042	60	3628	0,0023	0,229
	29.09.2015	12:55:54	588,0	0,085	86	7339	0,0035	0,351
	29.09.2015	13:53:31	588,5	0,125	104	10796	0,0044	0,435
	30.09.2015	09:07:26	592,6	0,9	283	80031	0,0114	1,140
	30.09.2015	14:17:15	593,0	1,1	314	98620	0,0121	1,207
	01.10.2015	12:30:04	594,7	2,1	423	178589	0,0149	1,491
	02.10.2015	10:07:25	595,7	3	506	256430	0,0167	1,668
	05.10.2015	14:25:01	598,8	6	729	531086	0,0220	2,202
	08.10.2015	13:12:57	600,9	9	887	785962	0,0255	2,552
	13.10.2015	09:42:15	603,1	14	1098	1205320	0,0294	2,935
	20.10.2015	13:14:23	605,6	21	1350	1822848	0,0336	3,359
	06.11.2015	14:13:52	610,1	38	1815	3295217	0,0413	4,130
	18.11.2015	15:53:25	613,5	50	2083	4337990	0,0470	4,699
	18.12.2015	13:01:59	622,2	80	2631	6919704	0,0618	6,183
	11.01.2016	09:43:56	627,5	104	2997	8981421	0,0709	7,088
	26.01.2016	13:51:02	629,2	119	3208	10292247	0,0738	7,383
	03.02.2016	14:11:45	630,4	127	3314	10984690	0,0759	7,592
	08.02.2016	15:30:29	631,2	132	3380	11421414	0,0773	7,727
	19.02.2016	11:40:53	633,0	143	3515	12358038	0,0803	8,027
	03.03.2016	09:58:49	635,1	156	3671	13475114	0,0839	8,385
	17.03.2016	10:27:24	637,5	170	3832	14686429	0,0880	8,799
	08.04.2016	11:08:19	642,1	192	4073	16589684	0,0960	9,597
	29.04.2016	11:36:17	646,0	213	4290	18405762	0,1026	10,256
	12.05.2016	12:48:37	647,7	226	4420	19533302	0,1054	10,543
	26.05.2016	12:34:37	649,2	240	4554	20742062	0,1081	10,807

Tabell 8: Masseopptaksmåling for ualdret fuktighetsopptaksprøve #3 i vannbad ved 90 °C.

Prøve #3	Dato	Klokkeslett	Masse [mg]	Døgn	sqrt(t)	t [s]	C [-]	Vektendring [%]
Tørrvekt	29.09.2015	10:56:18	686,6	0,0	0	0	0,0000	0,000
	29.09.2015	11:08:57	687,3	0,0088	28	759	0,0010	0,096
	29.09.2015	11:56:16	688,2	0,042	60	3598	0,0023	0,232
	29.09.2015	12:57:56	689,0	0,084	85	7298	0,0035	0,346
	29.09.2015	13:55:06	689,6	0,12	104	10728	0,0043	0,430
	30.09.2015	09:09:02	694,3	0,93	283	79964	0,0111	1,114
	30.09.2015	14:18:54	694,7	1,14	314	98556	0,0118	1,180
	01.10.2015	12:31:49	696,6	2,1	423	178531	0,0146	1,458
	02.10.2015	10:09:18	697,7	3	506	256380	0,0162	1,621
	05.10.2015	14:26:40	701,4	6	729	531022	0,0215	2,148
	08.10.2015	13:14:35	703,7	9	887	785897	0,0249	2,492
	13.10.2015	09:43:49	706,3	14	1098	1205251	0,0287	2,870
	20.10.2015	13:15:53	709,2	21	1350	1822775	0,0328	3,284
	06.11.2015	14:15:34	714,3	38	1815	3295156	0,0404	4,036
	18.11.2015	15:55:13	718,2	50	2083	4337935	0,0460	4,597
	18.12.2015	13:03:37	728,2	80	2631	6919639	0,0606	6,056
	11.01.2016	09:45:35	734,3	104	2997	8981357	0,0695	6,947
	26.01.2016	13:52:39	736,3	119	3208	10292181	0,0723	7,234
	03.02.2016	14:13:17	737,7	127	3314	10984619	0,0744	7,443
	08.02.2016	15:31:55	738,7	132	3380	11421337	0,0758	7,579
	19.02.2016	11:42:32	740,7	143	3515	12357974	0,0788	7,883
	03.03.2016	10:00:33	743,2	156	3671	13475055	0,0824	8,239
	17.03.2016	10:29:03	746,0	170	3832	14686365	0,0866	8,655
	08.04.2016	11:10:33	751,4	192	4073	16589655	0,0943	9,432
	29.04.2016	11:37:59	756,0	213	4290	18405701	0,1010	10,100
	12.05.2016	12:50:00	758,1	226	4420	19533222	0,1040	10,405
	26.05.2016	12:36:17	760,0		4554	20741999	0,1069	10,686

Tabell 9: Masseopptaksmåling for ualdret fuktighetsopptaksprøve #4 i vannbad ved 90 °C.

Sample 4	Dato	Klokkeslett	Masse [mg]	Døgn	sqrt(t)	t [s]	C [-]	Vektendring [%]
Tørrvekt	30.09.2015	09:30:32	681,9	0,0000	0	0	0,0000	0
	30.09.2015	09:44:38	682,6	0,0098	29	846	0,0010	0,099
	30.09.2015	10:00:46	683,0	0,0210	43	1814	0,0015	0,150
	30.09.2015	10:30:26	683,5	0,0416	60	3594	0,0022	0,222
	30.09.2015	11:28:00	684,4	0,0816	84	7048	0,0036	0,360
	30.09.2015	12:37:03	685,2	0,1295	106	11191	0,0047	0,471
	01.10.2015	09:08:12	690,4	0,9845	292	85060	0,0125	1,246
	01.10.2015	13:58:45	691,0	1,2	320	102493	0,0132	1,321
	02.10.2015	10:12:16	692,5	2,0	419	175304	0,0156	1,555
	02.10.2015	13:21:03	692,6	2,2	432	186631	0,0157	1,570
	05.10.2015	14:32:03	697,0	5,2	671	450091	0,0221	2,215
	08.10.2015	13:16:16	699,6	8,2	839	704744	0,0260	2,596
	13.10.2015	09:45:36	702,4	13,0	1060	1124104	0,0300	3,004
	20.10.2015	13:17:29	705,5	20,2	1320	1741617	0,0345	3,453
	06.11.2015	14:17:28	711,0	37,2	1793	3214016	0,0426	4,257
	18.11.2015	15:57:01	715,0	49,3	2063	4256789	0,0485	4,849
	18.12.2015	13:11:39	725,3	79,2	2615	6838867	0,0636	6,363
	11.01.2016	09:48:06	731,4	103,0	2983	8900254	0,0726	7,257
	26.01.2016	13:54:34	733,7	118,2	3195	10211042	0,0758	7,584
	03.02.2016	14:15:08	735,0	126,2	3302	10903476	0,0778	7,784
	08.02.2016	15:35:18	735,8	131,3	3368	11340286	0,0790	7,897
	19.02.2016	11:44:26	737,9	142,1	3504	12276834	0,0820	8,201
	03.03.2016	10:02:17	740,3	155,0	3660	13393905	0,0856	8,561
	17.03.2016	10:31:08	743,2	169,0	3822	14605236	0,0899	8,988
	08.04.2016	11:13:19	748,6	191,1	4063	16508567	0,0978	9,780
	29.04.2016	11:40:14	752,6	212,1	4281	18324582	0,1037	10,367
	12.05.2016	12:51:57	754,5	225,1	4410	19452085	0,1064	10,635
	26.05.2016	12:38:18	756,1	239,1	4545	20660866	0,1088	10,881

Tabell 10: Masseopptaksmåling for ualdret fuktighetsopptaksprøve #5 i vannbad ved 90 °C.

Sample 5	Dato	Klokkeslett	Masse [mg]	Døgn	sqrt(t)	t [s]	C [-]	Vektendring [%]
Tørrvekt	30.09.2015	09:31:56	799,2	0,0000	0	0	0,0000	0,000
	30.09.2015	09:46:17	799,9	0,0100	29	861	0,0009	0,091
	30.09.2015	10:02:38	800,3	0,0213	43	1842	0,0013	0,135
	30.09.2015	10:32:03	800,8	0,0417	60	3607	0,0020	0,201
	30.09.2015	11:29:53	801,7	0,0819	84	7077	0,0032	0,320
	30.09.2015	12:38:39	802,7	0,1297	106	11203	0,0043	0,434
	01.10.2015	09:09:45	808,4	0,9846	292	85069	0,0116	1,156
	01.10.2015	14:00:24	809,0	1,2	320	102508	0,0123	1,228
	02.10.2015	10:13:58	810,7	2,0	419	175322	0,0144	1,444
	02.10.2015	13:22:31	810,8	2,2	432	186635	0,0146	1,457
	05.10.2015	14:33:37	815,8	5,2	671	450101	0,0208	2,081
	08.10.2015	13:17:51	818,9	8,2	839	704755	0,0246	2,465
	13.10.2015	09:47:08	822,2	13,0	1060	1124112	0,0287	2,873
	20.10.2015	13:19:17	825,7	20,2	1320	1741641	0,0331	3,313
	06.11.2015	14:19:07	831,8	37,2	1793	3214031	0,0408	4,084
	18.11.2015	15:58:43	836,3	49,3	2063	4256807	0,0465	4,649
	18.12.2015	13:13:09	848,1	79,2	2615	6838873	0,0612	6,118
	11.01.2016	09:49:59	855,6	103,0	2983	8900283	0,0705	7,054
	26.01.2016	13:56:06	858,0	118,2	3195	10211050	0,0736	7,362
	03.02.2016	14:16:38	859,7	126,2	3302	10903482	0,0757	7,574
	08.02.2016	15:37:30	860,6	131,3	3368	11340334	0,0769	7,687
	19.02.2016	11:45:56	863,0	142,1	3504	12276840	0,0799	7,989
	03.03.2016	10:03:45	866,0	155,0	3660	13393909	0,0836	8,361
	17.03.2016	10:32:39	869,4	169,0	3822	14605243	0,0878	8,784
	08.04.2016	11:15:17	875,7	191,1	4063	16508601	0,0957	9,573
	29.04.2016	11:41:52	881,1	212,1	4281	18324596	0,1025	10,251
	12.05.2016	12:53:25	883,6	225,1	4410	19452089	0,1056	10,556
	26.05.2016	12:39:57	885,8	239,1	4545	20660881	0,1083	10,834

Tabell 11: Masseopptaksmåling for ualdret fuktighetsopptaksprøve #6 i vannbad ved 90 °C.

Sample 6	Dato	Klokkeslett	Masse [mg]	Døgn	sqrt(t)	t [s]	C [-]	Vektendring [%]
Tørrvekt	30.09.2015	09:33:14	604,4	0,0000	0	0	0,0000	0,000
	30.09.2015	09:47:55	605,0	0,0102	30	881	0,0009	0,094
	30.09.2015	10:04:10	605,2	0,0215	43	1856	0,0014	0,139
	30.09.2015	10:33:42	605,7	0,0420	60	3628	0,0021	0,206
	30.09.2015	11:31:45	606,4	0,0823	84	7111	0,0033	0,332
	30.09.2015	12:40:13	607,1	0,1298	106	11219	0,0044	0,438
	01.10.2015	09:11:32	611,6	0,9849	292	85098	0,0118	1,182
	01.10.2015	14:02:03	612,0	1,2	320	102529	0,0126	1,258
	02.10.2015	10:15:42	613,4	2,0	419	175348	0,0148	1,484
	02.10.2015	13:23:59	613,5	2,2	432	186645	0,0150	1,498
	05.10.2015	14:35:13	617,1	5,2	671	450119	0,0210	2,101
	08.10.2015	13:19:24	619,3	8,2	840	704770	0,0247	2,470
	13.10.2015	09:48:48	621,7	13,0	1060	1124134	0,0286	2,860
	20.10.2015	13:20:49	624,3	20,2	1320	1741655	0,0329	3,285
	06.11.2015	14:20:49	629,1	37,2	1793	3214055	0,0408	4,079
	18.11.2015	16:00:28	632,6	49,3	2063	4256834	0,0466	4,657
	18.12.2015	13:14:35	641,4	79,2	2615	6838881	0,0611	6,112
	11.01.2016	09:51:43	646,7	103,0	2983	8900309	0,0700	6,997
	26.01.2016	13:57:38	648,6	118,2	3195	10211064	0,0730	7,304
	03.02.2016	14:18:11	649,8	126,2	3302	10903497	0,0752	7,516
	08.02.2016	15:39:06	650,6	131,3	3368	11340352	0,0764	7,642
	19.02.2016	11:47:33	652,4	142,1	3504	12276859	0,0795	7,946
	03.03.2016	10:05:23	654,6	155,0	3660	13393929	0,0831	8,310
	17.03.2016	10:34:11	657,3	169,0	3822	14605257	0,0874	8,744
	08.04.2016	11:17:09	662,0	191,1	4063	16508635	0,0953	9,531
	29.04.2016	11:43:25	665,6	212,1	4281	18324611	0,1012	10,124
	12.05.2016	12:54:58	667,2	225,1	4410	19452104	0,1039	10,390
	26.05.2016	12:41:50	668,7	239,1	4545	20660916	0,1063	10,629

B2. Aldrede og ualdrede vannopptaksprøver i fuktig luft

Tabell 12 og Tabell 13 viser resultatene fra fuktighetsopptaksmålingene for henholdsvis ualdrede og aldrede prøveobjekt ved 90 °C og 85 % relativ luftfuktighet.

Tabell 12: Utviklingen til vannopptaket for ualdrede fuktighetsopptaksprøver plassert i klimaskap. Hvor a, b og c representerer 3 forskjellige fuktighetsopptaksprøver som ble målt parallelt og dataene er presentert i prosent endring fra tørrvekt. Null punktet til tiden er datoen hvor fuktigheten ble satt til 85 % RH i klimaskapet og tiden -1 representer fuktighetsopptaksmåling utført 1 dag før påsatt fuktighet.

Vannopptak ualdrede prøveobjekt i klimaskap			
Tid [døgn]	a	b	c
-1	-0,50	-0,46	-0,41
1,25	-0,18	-0,24	-0,16
2,98	-0,24	-0,26	-0,22
5,97	-0,26	-0,23	-0,25
9,00	-0,26	-0,31	-0,30
15,01	-0,33	-0,32	-0,30
16,97	-0,31	-0,30	-0,27
23,07	-0,43	-0,32	-0,41

Tabell 13: Utviklingen til vannopptaket for aldrede fuktighetsopptaksprøver plassert i klimaskap. Hvor a, b og c representerer 3 forskjellige fuktighetsopptaksprøver som ble målt parallelt og dataene er presentert i prosent endring fra tørrvekt. Null punktet til tiden er datoen hvor fuktigheten ble satt til 85 % RH i klimaskapet og tiden -1 representer fuktighetsopptaksmåling utført 1 dag før påsatt fuktighet.

Vannopptak aldrede prøveobjekt i klimaskap			
Tid [døgn]	a	b	c
-1	0,076	0,096	0,112
1,25	1,01	1,04	0,99
2,98	1,03	1,09	1,10
5,97	1,16	1,17	1,23
9,01	1,28	1,23	1,30
15,00	1,44	1,51	1,54
16,97	1,49	1,52	1,51
23,07	1,60	1,62	1,53

C. Vedlegg – Strekkprøving

I Tabell 14 og Tabell 15 vises fullstendig resultat fra strekkprøving av henholdsvis ualdret og aldret prøveobjekt.

Tabell 14: Resultater fra strekkprøving av ualdret feltstyrende krympestrømpe.

Ualdret	Maximum	Minimum	Mean	Coefficient of variance	Standard deviation
Gauge Length	20.000 mm	20.000 mm	20.000 mm	0.00%	0.00000 mm
Width	4.00 mm	4.00 mm	4.00 mm	0.00%	0.000 mm
Thickness	1.6300 mm	1.5500 mm	1.5875 mm	2.11%	0.033448 mm
Area	6.5200 mm ²	6.2000 mm ²	6.3500 mm ²	2.11%	0.13379 mm ²
Speed	0.417 mm/s	0.417 mm/s	0.417 mm/s	0.00%	0.000 mm/s
Break					
Stiffness	19663.0 N/m	16419.0 N/m	18443.0 N/m	6.60%	1217.2 N/m
Young's Modulus	63.023 MPa	52.965 MPa	58.078 MPa	6.13%	3.5574 MPa
Load at Maximum	130.12 N	116.79 N	123.93 N	3.83%	4.7514 N
Extension at Maximum	58.258 mm	49.074 mm	54.269 mm	6.11%	3.3140 mm
Tensile Strength	20.144 MPa	18.716 MPa	19.515 MPa	2.93%	0.57127 MPa
Percentage Strain at Maximum	291.29	245.37	271.34	6.11%	16.570
Work to Maximum	3.9704 J	3.4635 J	3.6682 J	5.61%	0.20586 J
Load at Break	129.90 N	116.74 N	123.74 N	3.79%	4.6920 N
Extension at Break	58.286 mm	49.079 mm	54.319 mm	6.14%	3.3332 mm
Stress at Break	20.125 MPa	18.708 MPa	19.485 MPa	2.92%	0.56894 MPa
Percentage Strain at Break	291.43	245.39	271.59	6.14%	16.666
Work to Break	3.9740 J	3.4642 J	3.6743 J	5.69%	0.20891 J
Tensile Energy to Break	32.048 MJ/m ³	26.566 MJ/m ³	28.961 MJ/m ³	6.96%	2.0166 MJ/m ³
Breaking Factor	32531.0 N/m	29197.0 N/m	30982.0 N/m	3.83%	1187.8 N/m
Load at Offset Yield	13.694 N	8.0013 N	10.848 N	26.24%	2.8463 N
Extension at Offset Yield	0.77042 mm	0.46242 mm	0.61642 mm	24.98%	0.15400 mm
Stress at Offset Yield	2.1264 MPa	1.2272 MPa	1.6768 MPa	26.81%	0.44959 MPa
Percentage Strain at Offset Yield	3.8521	2.3121	3.0821	24.98%	0.76999
Work to Offset Yield	0.0048104 J	0.0025945 J	0.0037025 J	29.93%	0.0011080 J
Load at Yield	121.37 N	48.966 N	85.166 N	42.51%	36.200 N
Extension at Yield	43.964 mm	20.042 mm	32.003 mm	37.38%	11.961 mm
Stress at Yield	18.614 MPa	7.6034 MPa	13.109 MPa	42.00%	5.5055 MPa
Percentage Strain at Yield	219.82	100.21	160.02	37.38%	59.807
Work to Yield	2.8211 J	0.66421 J	1.7426 J	61.88%	1.0784 J
Load at Lower Yield	121.14 N	48.592 N	84.868 N	42.74%	36.276 N
Extension at Lower Yield	43.980 mm	20.055 mm	32.018 mm	37.36%	11.963 mm
Stress at Lower Yield	18.580 MPa	7.5453 MPa	13.063 MPa	42.24%	5.5176 MPa
Percentage Strain at Lower Yield	219.90	100.28	160.09	37.36%	59.814

Work to Lower Yield	2.8230 J	0.66486 J	1.7439 J	61.88%	1.0791 J
----------------------------	----------	-----------	----------	--------	----------

Tabell 15: Resultater fra strekkprøving av aldret feltstyrende krympestrømpe.

Aldret	Maximum	Minimum	Mean	Coefficient of variance	Standard deviation
Gauge Length	20.000 mm	20.000 mm	20.000 mm	0.00%	0.00000 mm
Width	4.00 mm	4.00 mm	4.00 mm	0.00%	0.000 mm
Thickness	1.8000 mm	1.3900 mm	1.5840 mm	9.16%	0.14513 mm
Area	7.2000 mm ²	5.5600 mm ²	6.3360 mm ²	9.16%	0.58054 mm ²
Speed	0.417 mm/s	0.417 mm/s	0.417 mm/s	0.00%	0.000 mm/s
Break					
Stiffness	91533.0 N/m	22829.0 N/m	38636.0 N/m	68.79%	26579.0 N/m
Young's Modulus	277.37 MPa	63.414 MPa	121.57 MPa	65.30%	79.377 MPa
Load at Maximum	105.86 N	82.659 N	90.992 N	10.49%	9.5416 N
Extension at Maximum	19.422 mm	12.603 mm	17.532 mm	14.32%	2.5110 mm
Tensile Strength	16.039 MPa	11.480 MPa	14.441 MPa	11.01%	1.5905 MPa
Percentage Strain at Maximum	97.111	63.013	87.659	14.32%	12.555
Work to Maximum	1.3070 J	0.67712 J	1.0345 J	19.97%	0.20660 J
Load at Break	105.62 N	81.904 N	90.620 N	10.61%	9.6110 N
Extension at Break	19.485 mm	12.772 mm	17.596 mm	13.99%	2.4624 mm
Stress at Break	16.004 MPa	11.376 MPa	14.384 MPa	11.23%	1.6147 MPa
Percentage Strain at Break	97.425	63.859	87.980	13.99%	12.312
Work to Break	1.3117 J	0.69109 J	1.0401 J	19.55%	0.20329 J
Tensile Energy to Break	9.9373 MJ/m ³	4.7993 MJ/m ³	8.3244 MJ/m ³	22.14%	1.8430 MJ/m ³
Breaking Factor	26464.0 N/m	20665.0 N/m	22748.0 N/m	10.49%	2385.4 N/m
Load at Yield	105.86 N	82.961 N	93.075 N	10.31%	9.5969 N
Extension at Yield	19.422 mm	18.046 mm	18.764 mm	2.86%	0.53692 mm
Stress at Yield	16.039 MPa	14.206 MPa	15.181 MPa	4.29%	0.65073 MPa
Percentage Strain at Yield	97.111	90.231	93.821	2.86%	feb.46
Work to Yield	1.3070 J	0.99297 J	1.1238 J	10.32%	0.11595 J
Load at Offset Yield	14.120 N	7.5163 N	11.144 N	24.22%	2.6985 N
Extension at Offset Yield	0.61929 mm	0.12212 mm	0.41491 mm	43.81%	0.18175 mm
Stress at Offset Yield	2.4178 MPa	1.1388 MPa	1.8593 MPa	30.20%	0.56155 MPa
Percentage Strain at Offset Yield	3.0965	0.61058	2.0745	43.81%	0.90877
Work to Offset Yield	0.0055407 J	0.00061290 J	0.0030140 J	59.94%	0.0018066 J

D. Vedlegg - Beregninger

D1. Geometrisk kapasitans

Den geometriske kapasitansen for prøveobjektet må beregnes for å kunne regne ut ledningsevnen og den dielektriske responsfunksjonen. Geometrien er hentet fra 3.1.

$$C_0 = \varepsilon_0 \frac{A}{d}$$

$$C_0 = 8,85 \times 10^{-12} \times \pi \frac{(0,0145^2 - 0,0125^2)}{0,1} = 1,502 \times 10^{-14} [F]$$

D2. Ledningsevne

For å beregne ledningsevnen til prøveobjektene ble ligning 16 benyttet som gir gjennomsnittet av de siste 100 målepunktene. Det ble registrert 1 måling per sekund og lengden på målingene var 45 minutter som gir 2700 sekunder.

$$\sigma \approx \frac{1}{100} \times \sum_{t=2601}^{2700} \frac{\varepsilon_0}{C_0 U_0} [i_p(t) - |i_d(t)|]$$

D3. Dielektrisk responsfunksjon

Den dielektriske responsfunksjonen er en kontinuerlig og beregnes ved bruk av depolarisasjonsstrømmen, den geometriske kapasitansen og spenningen benyttet ved polarisasjonen. Det er bare verdiene fra $t=30$ og utover som er benyttet på grunn av Megger sine interne koblinger som angitt i 3.5.2.

$$f(t) = -\frac{i_d(t)}{C_0 U_0}$$

