

# Overoppheting av mellomspennings PEX-kabelskjøter

Termisk aldring karakterisert ved PD-målinger

**Karoline Skjelsvik**

Master i energibruk og energiplanlegging

Innlevert: juli 2017

Hovedveileder: Frank Mauseth, IEL

Medveileder: Sverre Hvidsten, SINTEF Energi

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet  
Institutt for elkraftteknikk



# Oppgavetekst

En betydelig andel av det norske mellomspennings kabeldistributionsnett har nådd en alder som er høyere enn den forventede levetiden på 30-40 år. Fra driftserfaringer ser man at kabeltilbehør, som f.eks. kabelskjøter, har en kortere forventet levetid enn selve kabelen. Det er observert mange feil og havarier på varmekrympede kabelskjøter som ble installert på 80-tallet, som kan relateres til overoppheting av skjøtehylsene.

Tilstanden til isolasjonen i kabelskjøtene kan bli anslått ved hjelp av målinger av partielle utladninger (PD) og/eller dielektrisk spektroskopi. For kabelskjøter og termineringer blir det ofte brukt et feltstyrende materiale (FGM) for å oppnå en ønsket feltfordeling. Dette for å unngå lokale feltøkninger som kan føre til partielle utladninger og havari. De dielektriske egenskapene til FGM vil være avhengig av frekvensen til den påtrykte spenningen, men også av driftsbetingelser som fuktighet og temperatur.

Arbeidet vil hovedsakelig være eksperimentelt, der testobjektene er PEX-kabelskjøter hvor effekten på isolasjonssystemet ved forhøyet lokal temperatur under drift skal studeres ved måling av PD. Forhøyet temperatur er lokalisert til den metalliske skjøtehylsen. Skjøter av samme type skal påkjennes 150 °C ved leder under lastsykling, ved konstant 150 °C under tørre omgivelser samt under fuktige betingelser. Hypotesen er at degradering av FGM materialet i skjøten under slike betingelser fører til PD.



# Forord

Denne rapporten er et resultat av gjennomført arbeid i forbindelse med masteroppgaven våren 2017 ved Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet (NTNU), utført ved Institutt for Elkraftteknikk. Oppgaven vekter 30 studiepoeng, og er en videreføring av prosjektoppgaven som ble utført høsten 2016.

Jeg vil først takke mine veiledere, førsteamanuensis Frank Mauseth ved NTNU og seniorforsker Sverre Hvidsten ved SINTEF Energi, for gode råd og innspill angående gjennomførelsen av oppgaven.

En spesielt stor takk til Horst H. Förster som har tatt seg tid til å vise og lære meg hvordan man monterer varmkrymp kabelskjøter, som har blitt brukt i masterarbeidet. Horst har kommet med mange gode innspill og vært til stor inspirasjon. Takk til Morten Flå, avdelingsingeniør ved Institutt for Elkraftteknikk, som har laget flere deler til laboratorieoppsettet.

I tillegg vil jeg takke medstudent Sylvi Brækken som har bistått meg i det praktiske arbeidet på laben der det har vært kjekt å ha en ekstra hånd. Med den største selvfølge må det også rettes en stor takk til medstudent Tone Madsen Følling, for alle de sene kveldene på Gløshaugen med masterjobbing, det hadde blitt alt for kjedelig uten deg! Jeg ønsker også å takke alle andre som har hjulpet meg underveis, dette kunne ikke blitt gjennomført hvis det ikke var for dere!

Sist, men ikke minst ønsker jeg å takke foreldrene mine for alt, og jeg beklager for det svingende humøret dere har blitt et offer for i løpet av masteråret. Jeg er ferdig med det nå, lover! En ekstra takk til min kjære far, Gaute Skjelsvik, som er mitt faglige forbilde. Håper jeg kan like mye som deg en dag (både faglig og ikke-faglig)!

*Trondheim, juli 2017*

Karoline Skjelsvik



# Sammendrag

En betydelig andel av det norske mellomspennings kabeldistribusjonsnettet har passert den forventede levetiden på 30 år. Driftserfaringer viser at kabeltilbehør som f.eks. kabelskjøter har en kortere forventet levetid enn selve kabelen, og i den sammenheng har det blitt observert flere feil på varmekrympede kabelskjøter som ble installert på 1980-tallet. Årsaken til feilene som har oppstått er ofte overoppheting av skjøtehylsene på grunn av høy kontaktmotstand. På bakgrunn av dette har det i masterarbeidet blitt laget PEX-kabelskjøter med redusert ledertverrsnitt, med et ønske om å oppnå en redusert kontakt eller en økt kontaktmotstand mellom lederen og skjøtehylsen.

Det er et økende behov for tilstandskontroll av høyspenningskomponenter på grunn av det stadig økende elektrisitetsforbruket, og at det stilles strenge krav til stabil strømforsyning med hensyn til spenningsstabilitet og frekvenskvalitet. En av metodene for å undersøke tilstanden til isolasjonen i kabelskjøtene er ved hjelp av målinger av partielle utladninger (PD). Dette har derfor blitt gjort i dette masterarbeidet. I tillegg til å montere kabelskjøtene har det vært fokus på hvilken effekt forhøyet lokal temperatur vil ha på isolasjonssystemet ved måling av PD, og det har derfor blitt satt opp en laboratoriekrets for å kunne vurdere tilstanden til kabelskjøtene.

Kabelskjøtene som ble laget i denne masteroppgaven ble utsatt for en akselerert aldringsprosess, der én kabelskjøt ble temperatursyklet, mens to andre kabelskjøter ble påtrykket en konstant temperatur på 150 °C. Én temperatursykel tilsvarer en runde med oppvarming til 150 °C ved lederen, og deretter nedkjøling til romtemperatur (~ 20 °C).

Resultatene viser at effekten av å utsette det ene testobjektet for en temperatursykling i 528 timer viser ingen tydelige tegn til aldring av testobjektet. Det konkluderes med at forholdet mellom temperatur og tidsperioden forsøkene ble gjennomført på ikke var tilstrekkelig for å kunne detektere PD, som følge av aldring.

Den ene kabelskjøten som ble påtrykt en konstant temperatur var utsatt for fuktige omgivelser, mens den andre var i tørre omgivelser. Etter bare to uker i aldringsprosessen, kunne det registreres PD-aktivitet på den fuktige kabelskjøten. Da hadde kabelskjøten gått fra å være PD-fri opp til 40 kV, til å ha en tennspenning på 8 kV. Gjennom aldringsprosessen har det sannsynligvis trengt vann inn i skjøten. Det kan derfor være av interesse å fortsette å gjøre målinger på denne kabelskjøten for å se om tennspenningen vil øke igjen når fuktigheten trenges ut av kabelen.

Kabelskjøten som ble påtrykt en konstant temperatur i tørre omgivelser registrerte ingen PD under noen av målingene de første ukene i aldringsprosessen. Etter hvert oppstod det derimot et termisk gjennomslag, og disseksjon av kabelskjøten måtte til. Disseksjonen viste at det hadde oppstått et termisk gjennomslag langs den feltstyrende slangen i skjøten.





# Abstract

A significant part of the Norwegian medium voltage cable distribution system has exceeded the expected lifetime of 30 years. Generally, cable accessories have a shorter expected lifetime than the cable itself. In case of heat-shrink joints installed in the 80's, many service failures have occurred due to overheating of the metallic connector. Because of this, XLPE cable joints with a reduced cross-section have been made to achieve a reduced contact or increased contact resistance between the conductor and the metallic connector.

The ever-increasing electricity consumption and a severe need for a stable power supply causes an increasing need for condition assessment of high voltage components. One method for condition monitoring of high voltage components is partial discharge (PD) measurements, which is utilized for cable joints in this master thesis. In addition to making the cable joints, the effect of local heightened temperature on the isolation system by conducting PD measurement is examined. Thus, a laboratory circuit has been made to conduct condition monitoring of the cable joints.

The cable joints constructed in this master thesis were exposed to an accelerated aging process, where one cable joint was load cycled while two other joints were aging at a constant temperature of 150 °C. One load cycle means that the cable joint is heated up to 150 °C and then cooled down to room temperature (~ 20 °C).

It was not detected any PD activity in the cable joint that was load cycled. This might be because of the time between the start of a new cycle after another cycle has ended, or that the joint should have aged over a longer period of time to give results. Therefore, it may be interesting to continue to age this cable joint to see how long aging time is required for PDs to occur.

One of the cable joints that was aged at a constant temperature was exposed to a moist environment, while the other joint was in a dry environment. After just two weeks in the aging process, PD activity was detected on the moist cable joint. During this measurement, the cable joint had gone from being PD-free up to 40 kV, to having an inception voltage of 8 kV. During the aging process, water has probably penetrated the joint. It may therefore be interesting to continue with measurements on this cable joint and see if the inception voltage will increase again, when the moisture is pressed out of the cable.

No PDs were detected in the cable joint that was aged at a constant temperature in a dry environment during any of the measurements the first few weeks of the aging process. However, a thermal breakdown occurred after three weeks and dissection of the cable joint was done. The dissection showed that there had been a thermal breakdown along the stress control tube.



# Innhold

Oppgavetekst .....	i
Forord .....	ii
Sammendrag .....	iii
Abstract .....	iv
1 Innledning.....	1
1.1 Bakgrunn og motivasjon.....	1
1.2 Mål og arbeid.....	2
2 Teori .....	3
2.1 Tilstandskontroll.....	3
2.2 Kabelskjøt.....	4
2.2.1   Design og material.....	4
2.2.2   Feltkontroll .....	6
2.2.3   Metalliske skjøter .....	9
2.3 PEX-isolasjon.....	12
2.3 Aldringsmekanismer .....	13
2.3.1   Oksidasjon .....	13
2.3.2   Deformasjon .....	13
2.3.3   Delaminering .....	14
2.3.4   Partielle utladninger.....	14
2.4 Analyse av PD-målinger.....	19
2.4.1   Phase Resolved Partial Discharge Analysis, PRPDA.....	19
3 Eksperimentelt.....	21
3.1 Innledning.....	21
3.2 Testobjekt .....	22
3.2.1   Preparering testobjekt .....	25
3.2.2   Montering av utladningsfrie termineringer.....	27
3.2.3   Aldringsbetingelser.....	28
3.3 Eksperimentelt måleoppsett for detektering av delutladninger .....	30
3.3.1   Prosedyre for måling av delutladninger.....	31
4 Resultat og diskusjon.....	33
4.1 Innledende målinger .....	33
4.2 Temperatursykling til 150 °C på leder .....	34
4.2.1   Aldringsbetingelser funnet ved målinger på testobjekt #1 .....	34
4.2.2   Testobjekt #2 .....	35
4.3 Konstant 150 °C .....	39

4.3.1   Tørre omgivelser.....	39
4.3.2   Fuktige omgivelser .....	43
4.4 Oppsummering .....	50
5 Konklusjon .....	51
6 Videre arbeid .....	53
7 Referanser.....	54
Vedlegg A – Utstysrliste .....	1
Vedlegg B – MATLAB-skript .....	2
Vedlegg C – Montering og dimensjonering av hylse .....	3
Vedlegg D.1 – Disseksjon av testobjekt #3.....	4
Vedlegg D.2 – PD-målinger av testobjekt #4.....	5
Vedlegg E – Poster presentasjon. Hvordan lage en kabelskjøt .....	13

# 1 Innledning

## 1.1 Bakgrunn og motivasjon

Et stadig økende forbruk av elektrisk energi og rask teknologisk utvikling har gjort dagens samfunn mer og mer sårbart for brudd og forstyrrelser i strømforsyningen. Det stilles strenge krav til stabil strømforsyning med hensyn til spenningsstabilitet og frekvenskvalitet. For å opprettholde en pålitelig og sikker strømforsyning med ny og uforutsigbar lastproduksjon er det nødvendig med hyppigere tilstandsvurderinger av høyspenningskomponenter. Hyppigere tilstandsvurderinger vil gjøre at potensielle feil kan unngås på et så tidlig stadium som mulig, og utskiftninger kan skje når det lønner seg økonomisk.

Kabler og andre høyspenningskomponenter har en estimert levetid på mer enn 30 år. Driftserfaringer viser at kabeltilbehør, som f.eks. skjøter, har kortere forventet levetid enn selve kablen. Dette skyldes blant annet manuelt arbeid, der for eksempel uforsiktig eller feil bruk av kniver er en av hovedårsakene til at feil oppstår under installasjon [3].

Siden en betydelig andel av det norske mellomspennings kabeldistribusjonsnettet er eldre enn den forventede levetiden på 30 år, har det blitt observert flere feil på varmekrympede kabelskjøter som ble installert på 1980-tallet [3]. Feilene som har oppstått er ofte på grunn av overoppheting av skjøtehylsene på grunn av høy kontaktmotstand [3].

På grunn av det grønne skiftet, der vindturbiner og solceller blir tatt mer i bruk, vil belastningen på nettet endres. Det vil bli mer uforutsigbar produksjon som kan gi store lastvariasjoner, der produksjonen kan gå fra ingen til full produksjon innenfor et kort tidsintervall. Dette har allerede vist seg å være en stor belastning på mellomspennings kabeldistribusjonsnettet ved vindkraftproduksjon, der det har oppstått flere termiske utfordringer spesielt i kabelskjøter kort tid etter installasjon [4].

## 1.2 Mål og arbeid

Målet med denne masteroppgaven har vært å lage et laboratorieoppsett for å kunne måle og analysere partielle utladninger (PD) på tre PEX-kabelskjøter. Hovedfokuset i laboratoriearbeidet har vært å undersøke om høy lokal temperatur i kabelskjøtens isolasjonssystem fører til delutladninger over tid under ulike aldringsbetingelser.

I denne oppgaven har testobjekter med PEX-isolasjon blitt studert for partielle utladninger. PEX (eng: XLPE, cross-linked polyethylene) står for tverrbundet polyetylen, og er det materialet som er vanligst å bruke i høyspenningskabler i Norge [5]. PEX lages gjennom en vulkaniseringsprosess. Denne prosessen kryssbinder polyetylenmolekylene (PE) under en såkalt «herdeprosess» (vulkaniseringsprosess). På denne måten dannes et materiale som vil ha de samme elektriske egenskapene som PE, men med bedre mekaniske egenskaper. For eksempel kan materialet beholde en viss fasthet og ikke smelte, selv om isolasjonen blir varmere enn maksimal driftstemperatur på 90 °C [5]. Kvaliteten til en PEX-kabel bestemmes minst like mye av vulkaniseringsprosessen som av råmaterialene som brukes [5].

Med utgangspunkt i problemstillingen er det laget arbeidspunkter som ligger til grunn for det eksperimentelle arbeidet;

- Endetermineringer skal lages og testes, for å se om de kan lages bra nok på egenhånd
- Dummy-kabelen fra prosjektarbeidet skal testes for å se om termineringene fortsatt er PD-fri, slik at kabelen kan brukes videre i masterarbeidet
- Kabelskjøter skal monteres og deretter testes før videre bruk i laboratorieforsøk
- Kabelskjøtene skal aldres på to forskjellige måter, der én kabelskjøt skal lastsykles mens de to andre skjøtene skal aldres under konstant temperatur i et varmeskap
- Det skal utføres PD-målinger på kabelskjøtene
- PD-målingene skal analyseres. Hvilken innflytelse har fukt og temperatur på PD?
- Det skal utføres disseksjon dersom tiden tillater det

Masteroppgaven er skrevet med forutsetning om at leseren har grunnleggende kunnskap innenfor elkraft.

# 2 Teori

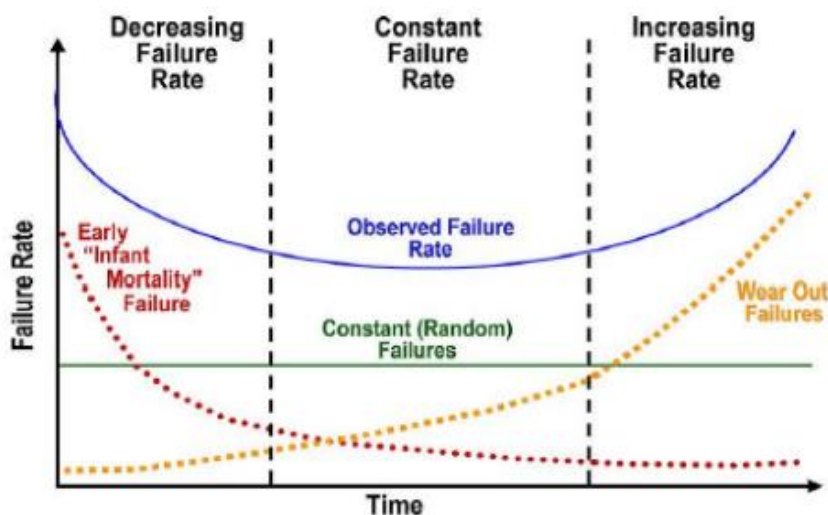
I dette kapitlet blir relevant teori for oppgaven presentert. Masteroppgaven omhandler PEX-kabelskjøter, og teorien vil gradvis gå fra å være generell til å belyse spesifikke emner som anses som spesielt viktig å ha bakgrunnskunnskap om.

## 2.1 Tilstandskontroll

Norge er, i likhet med resten av verden, avhengig av et stabilt og sikkert strømnett. Med jevnlig tilstandskontroll av høyspenningskomponenter kan påliteligheten og stabiliteten til strømnettet øke. Verdifull informasjon om tilstanden til komponentene kan innhentes, som f.eks. antatt restlevetid.

Ved å vite mer om tilstanden til komponentene i kraftsystemet, kan komponentene skiftes ut før det oppstår alvorlige feil. Tilstandskontroll er også viktig for å kunne utføre reparasjoner og utskiftninger av komponenter når det lønner seg mest økonomisk sett, blant annet for å unngå høye avbruddskostnader.

«Badekarkurven» er en ofte brukt illustrasjon for å vise feilraten til en komponent. Som vist i Figur 1 vil feilraten først reduseres. Dette fordi de tidlige feilene ofte skyldes produksjons- eller designfeil og vil slå ut kort tid etter at komponenten er satt i drift [1]. Etter en stund vil feilraten stabilisere seg, for deretter å øke igjen etter hvert som levetiden til komponenten øker.



Figur 1: "Badekarkurven" illustrerer feilraten til en høyspenningskomponent [1].

Temperatur, fuktighet, forurensning, støv, elektriske og mekaniske påkjenninger er noen av de viktigste belastningene en komponent kan utsettes for [6].

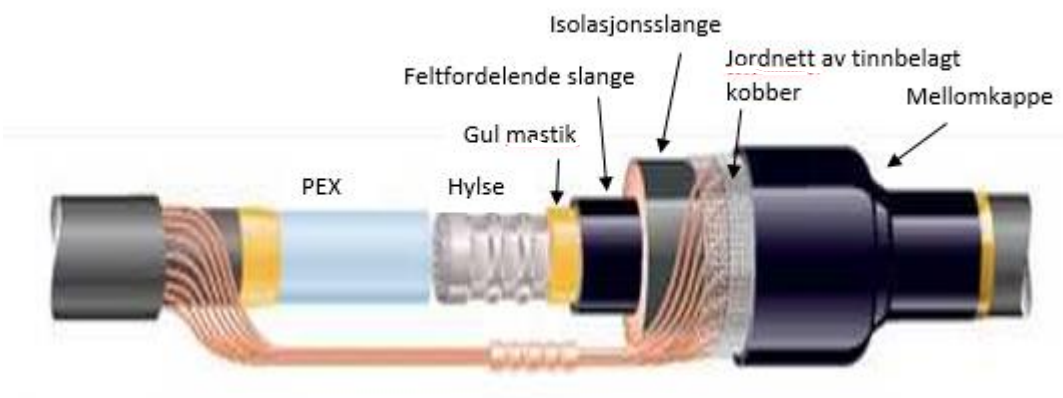
For å studere tilstanden til en komponent kan det blant annet gjøres målinger av partielle utladninger, dielektrisk respons og visuell inspeksjon [6]. I denne oppgaven fokuseres det på måling av partielle utladninger, og dette blir nærmere forklart i kapittel 2.3.4.

## 2.2 Kabelskjøt

Det finnes begrensninger for hvor lang en kabel kan være, derfor må det være mulig å kunne skjøte kabler sammen. Skjøten sin hovedoppgave er å opprettholde god kontakt mellom de to lederne som skjøtes sammen. Kablene kan enten skjøtes sammen ute i felt eller under produksjon. Dersom kablene skjøtes sammen i produksjonsanlegget må disse kunne tåle å bli viklet sammen for å kunne transporteres [5].

For å skjøte kabler sammen må alle lag inn til lederen fjernes slik at kablene kan kobles sammen med en skjøtehylse. Skjøtehylsen sørger for elektrisk kontakt mellom lederne. Figur 2 viser typisk oppbygging av en kabelskjøt. Det brukes ulike slanger for blant annet å kontrollere det elektriske feltet, opprettholde isolasjonsevnen og sørge for at vann ikke trenger inn i kabelen.

Når kabler skal skjøtes sammen trengs det erfarne fagfolk. Dette for å unngå at skjøten skal havarere på grunn av feil som knivkutt, delaminering som følge av dårlig behandling under montering, dårlig kontakt mellom ledere eller at krympingen av de ulike lagene ikke blir gjort godt nok [7].



Figur 2: Typisk oppbygging av en kabelskjøt [2].

I denne masteroppgaven har det blitt montert varmekrympede kabelskjøter fra Raychem, og en nærmere forklaring på montering av disse er gitt i den eksperimentelle delen av oppgaven.

### 2.2.1 | Design og material

Når kabelskjøter skal monteres er det flere ulike design som kan benyttes. Eksempler på dette er vikleskjøt og krympeskjøt (varm- eller kaldkrymp) [7]. Som tidligere nevnt har det i denne masteroppgaven blitt montert varmekrympede kabelskjøter fra Raychem. Raychem-produktene har vært på markedet i over 60 år og er en velkjent teknologi [8]. Dette skjøtesystemet leveres per fase og uten skjøtehylser, så hylsene måtte lages selv. Skjøtesystemet kan dekke mange

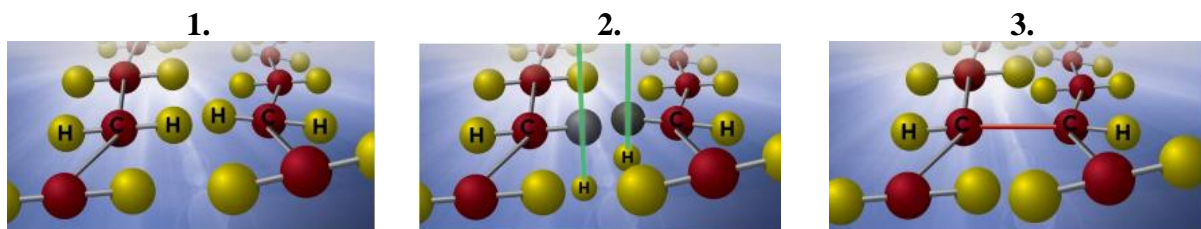


ulike tverrsnitt, alt fra 95-185 mm<sup>2</sup> for 12 kV kabler, siden skjøtesystemet er satt sammen av krympekomponenter med et stort krympeforhold [2].

Materialene i Raychem-skjøtene baserer seg på bruk av termoplastiske polymer materialer (som f.eks. PVC eller gummi), der ledende og halvledende partikler blir tilsatt. Tilsatte partikler kan være SiC, ZnO og sot [9].

Under fremstilling blir polymermaterialene i de varmekrympede Raychemskjøtene utsatt for elektronstråling. Siden elektronstrålingen har så høy energi vil molekylene som kolliderer med hverandre kryssbindes. Kryssbindingen skjer ved at hydrogenatomene blir skilt fra polyetylenkjedene på grunn av høy-energi elektronstrålingen. Dette vil føre til at karbonatomene binder seg sammen på tvers av de brutte lenkene og danner nye forbindelser [8].

Prosessen for kryssbinding kan vises ved [8]:



Figur 3: Figuren viser prosessen for kryssbinding. 1) Lenker av polyetylen 2) Elektronstråling skiller hydrogenatomene fra polyetylenkjeder 3) Karbonatomene danner nye forbindelser [8].

Når varmekrympmaterialet kryssbindes mister materialet smelteegenskapene. Dette gjør at materialet kan varmes til temperaturer over smeltetemperatur, uten at det smelter. Når temperaturen overgår smeltetemperatur kan varmekrympmaterialet formes som ønskelig og forbli som ønsket, selv når temperaturen minker igjen [8].

Skjøtesystemet som har blitt brukt i denne masteroppgaven ble levert med blant annet feltstyrende slange, isolasjonsslange og mellomkappe. Under montering skulle alle disse delene varmekrympes ved å bruke en gassbrenner. Delene ble levert i «utvidet» form, som vil si at når delene ble varmet opp over smeltetemperatur, vil de krympe til sin originale form, se Figur 4.



Figur 4: Bildet viser hvordan materialet vil krympe tilbake til sin originale form ved å bli påført høy temperatur [8].

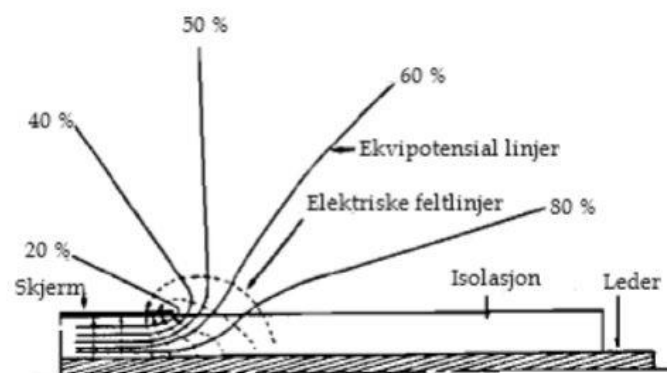
En kort beskrivelse av de ulike materialene som har blitt brukt for å montere kabelskjøtene kan finnes i Tabell 1.

Tabell 1: Tabellen gir en kort beskrivelse av de ulike materialene som har blitt brukt for å montere kabelskjøtene.

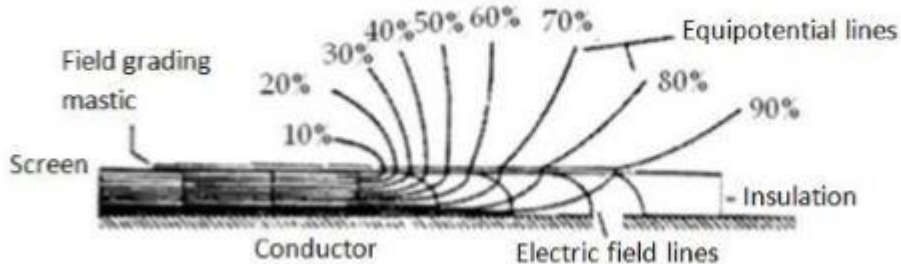
<b>Gul mastik</b>	Legges på for å fylle alle hulrom
<b>Feltstyrende slange (JSCR)</b>	Sørger for jevn feltbelastning over hele skjøten.
<b>Tinnbelagt kobbernett</b>	Legges for en kontinuitet av skjermarealet og jordingspotensialet gjennom skjøten
<b>Isolerende slange (ERIC)</b>	Krympes på for å opprettholde isolasjonsnivået.
<b>Mellomkappe (MWTM)</b>	Krympes på for å beskytte mot korrosjon og bevare de mekaniske egenskapene
<b>Ytterkappe (CFSM)</b>	Ytre beskyttelse, og sørger for at det ikke skal trenge inn vann

## 2.2.2 | Feltkontroll

Prinsippet for feltkontroll i kabelskjøter og endetermineringer er den samme, og anses som svært viktig. Ved å montere gode skjøter og endetermineringer kan feltforsterkninger unngås. Uten feltkontroll kan det elektriske feltet bli for stort slik at partielle utladninger oppstår. Som vist i Figur 5 er det mest kritiske punktet mellom isolasjonslaget og den ytre halvlederen. Ved å strippe av det ytre halvlederlaget på kabelen vil ikke geometrien lengre være slik det opprinnelig var, og det kan oppstå feltforsterkninger. Ved å legge et lag med feltstyrende materiale i skjøt og termineringer vil det elektriske feltet fordele seg slik som vist i Figur 6.



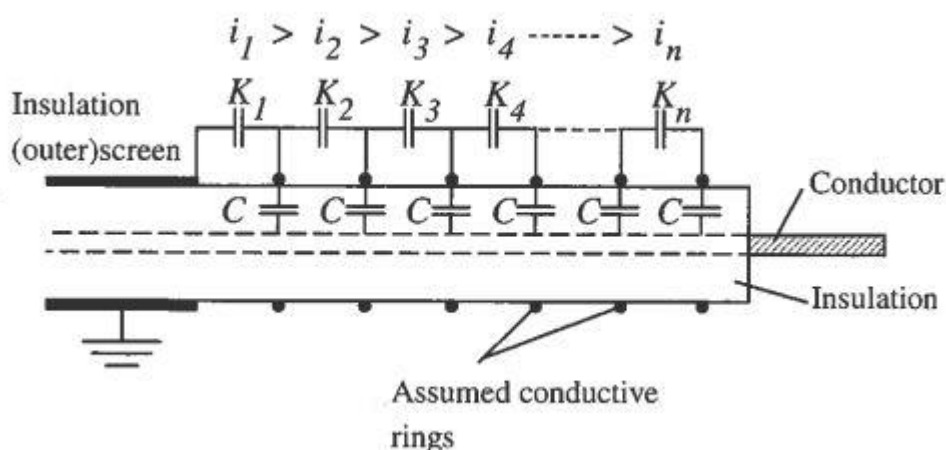
Figur 5: Ekipotensiallinjer ved enden av en kabel viser at det mest kritiske punktet hvor PD kan oppstå er punktet mellom isolasjonslaget og den ytre halvlederen [5].



Figur 6: Ekvipotensiallinjer med feltstyrrende materiale [10].

Erfaringer viser at holdfastheten ved overflatene som skjøtes sammen er betydelig lavere enn for selve isolasjonsmaterialet. Ved å holde flatene fri fra forurensing, sørge for at de har god kontakt og opprettholde feltkontroll, kan holdfastheten bedres [5].

Som en forenkling kan overflaten på kabelen ses på som ledende ringer rundt kabelen, se Figur 7.

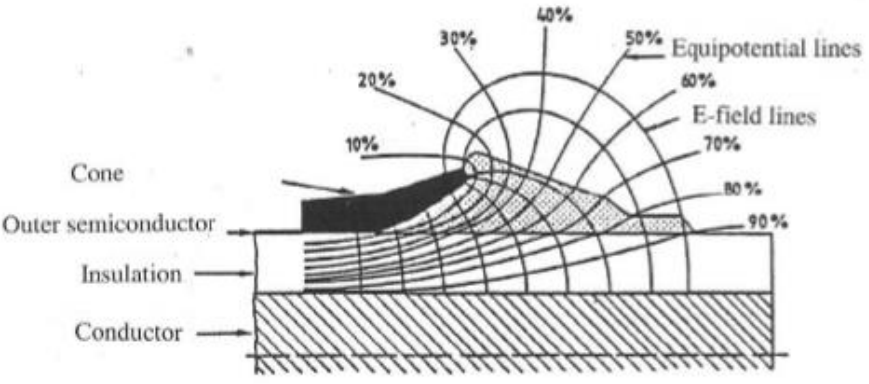
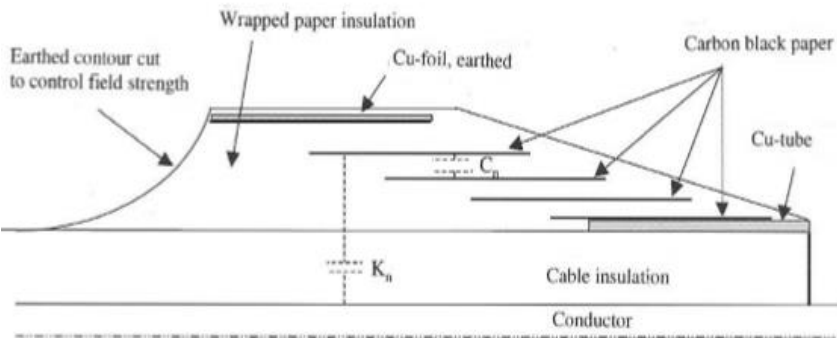
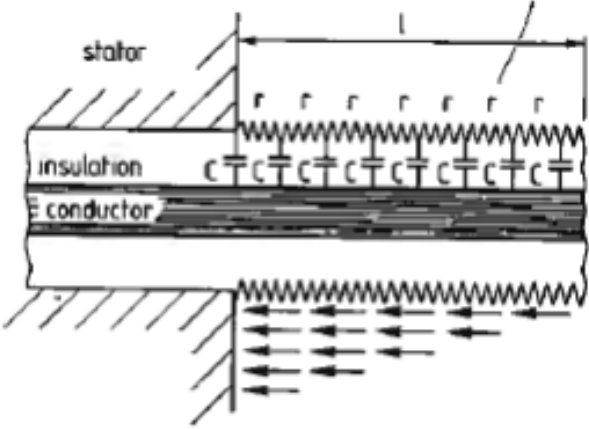


Figur 7: En forenklet krets for å illustrere feltet langs enden på en kabel [5].

C representerer kapasitansen mellom hver ring og lederen, og K representerer kapasitansen mellom ringene. Når en spenning påtrykkes vil strømmen flyte gjennom kapasitansene C, via kapasitansene K og så til jord. Dette vil si at strømmen vil være høyere når den er nærmere isolasjonsskjermen, og det samme for spenningen over kapasitansene K. Den maksimale feltstyrken vil øke med en faktor på  $\sqrt{\frac{C}{K}}$  i retning mot isolasjonsskjermen [5].

Det skilles vanligvis mellom fire ulike teknikker for elektrisk feltkontroll i termineringer og skjøter og disse er vist i Tabell 2.

Tabell 2: Tabellen gir en kort oversikt over fire ulike teknikker for elektrisk feltkontroll i termineringer og skjøter.

Fire teknikker for elektrisk feltkontroll i termineringer og skjøter	
<p>Feltstyrende konus</p>	 <p>Feltstyrende konus utformes slik at det elektriske feltet langs overflatene holdes på et slikt nivå at det ikke er fare for at det oppstår transiente spenninger.</p>
<p>Kondensator-konus</p>	 <p>Denne teknikken er vanlig for papir/olje-kabler. Teknikken går ut på å integrere ledende lag som skal flyte elektrisk fritt i isolasjonen.</p>
<p>Resistiv feltstyring</p>	 <p>Ved å legge et lag med halvledende lakk vil kapasitansene <math>K</math> (fra Figur 7) bli koblet i parallell med resistanser <math>R</math>. Det brukes helst materialer med en funksjon slik at feltstyrken er en funksjon av strømtettheten.</p>
<p>Refraktiv feltstyring</p>	<p>En kombinasjon av kapasitiv og resistiv feltstyring som bruker materialer med høy permittivitet.</p>

### 2.2.3 | Metalliske skjøter

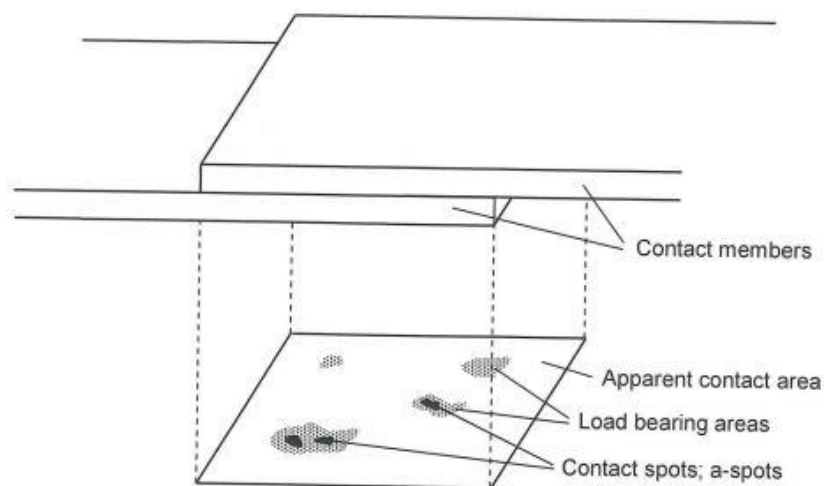
Alle typer kontakter og skjøter inneholder minst ett område som vil ligge mellom to elektriske ledere, og har dermed en elektrisk kontakt [11]. Når kontaktmotstanden øker vil det bli generert varme, og dette kan så spre seg videre til isolasjonsmaterialet og lederen. Dersom dette ikke oppdages og blir gjort noe med kan det oppstå termisk gjennomslag. Det er observert mange feil på varmekrympede kabelskjøter som ble installert på 80-tallet på grunn av blant annet overoppheting av skjøtehylser, og det er derfor interessant å se litt nærmere på teorien om kontakter.

En av hovedoppgavene til kontakter er å sørge for en lav overføringsmotstand, slik at ekstrem oppvarming kan unngås når det går store strømmer [11]. Det er derfor viktig at kontakten tåler alle termiske og mekaniske påkjenninger de kan bli utsatt for.

#### Kontaktflate

Ved sammenkobling av to komponenter vil det kun være noen få punkter der kontaktene først møtes. Det er overflaten til kontaktene som bestemmer hvor disse punktene vil være. Når trykkkraften i kontaktene øker vil kontaktene bli deformert. Dette fører til at kontaktoverflaten blir større og at det vil oppstå nye kontaktpunkter [11]. Disse kontaktpunktene kalles lastbærende område, og kan ses i Figur 8.

Ved kontakt med luft dannes det raskt et tynt oksidlag på overflaten av metaller, og ofte er dette oksidlaget elektrisk ledende. Strøm kan kun flyte på overflaten av kontaktpunktene der det er direkte kontakt mellom metallene, og på grunn av dette vil det kun være en liten del av det lastbærende området som vil være elektrisk ladende. Disse strømførende områdene tilsvarer ofte godt under 1 % av det tilsynelatende kontaktområdet [11].



Figur 8: Kontaktoverflaten i en stasjonær kontakt [11].

## Temperatur i kontaktpunkt

Kontakter har stort sett veldig lav resistans, typisk i området mikroohm [ $\mu\Omega$ ]. Likevel kan den lave resistansen føre til en betydelig lokal økning av temperaturen i kontaktpunktene, siden andelen av metallet som varmes er veldig liten ( $\sim 10^{-6} - 10^{-9}$  gram) [11].

Temperaturøkningen som oppstår i kontaktpunktet kan uttrykkes ved spenningsfallet over kontaktflaten. Gitt at elektrodene er laget av samme materialet, i for eksempel symmetriske kontakter, vil temperaturen fordeles symmetrisk rundt kontaktoverflaten [11];

$$T_{max} = \sqrt{\frac{U^2}{4 \cdot L} + T_0^2} \quad (1)$$

Der,

Tabell 3: Tabellen gir en kort forklaring av elementene i ligning (1).

Forklaring på de ulike elementene i ligning (1)	
$T_{max}$	Den maksimale temperaturen som oppstår i kontaktpunktet
$U$	Spenningen over kontakten
$T_0$	Absolutt temperatur i kontakten langt fra kontaktpunktet
$L$	$2,4 \cdot 10^{-8} V^2/K^2$ , brukt for de fleste metaller

Fra ligning (1) og Tabell 3 kan det merkes at temperaturøkningen kun er avhengig av spenningsfallet over kontakten.

Siden kontaktpunktene er omgitt av metall blir varmen som oppstår raskt ledet vekk, siden metall har gode varmeledningsevner. Dette gjør at temperaturøkningen som oppstår er veldig lokal.

Med økende temperatur, øker også den elektriske resistiviteten for metaller. Det vil si at resistansen i kontaktpunktet er svært avhengig av temperaturen. Temperaturavhengigheten til kontaktnotstanden som en funksjon av den lokale temperaturstigningen i kontaktpunktene kan tilnærmet ses som [11];

$$R = R(T_0) \cdot [1 + \frac{2}{3} \alpha (T_{max} - T_0)] \quad (2)$$

Der,

Tabell 4: Tabellen gir en kort forklaring på de ulike elementene i ligning (2).

Forklaring på de ulike elementene i ligning (2)	
$T_{max}$	Den maksimale temperaturen som oppstår i kontaktpunktet
$R(T_0)$	Kontaktnotstanden som ikke er påvirket av noen oppvarming i kontaktpunktet
$T_0$	Absolutt temperatur i kontakten langt fra kontaktpunktet
$\alpha$	Temperaturkoeffisienten av resistiviteten til metallet som brukes



### Aldring av kontakter

Størrelse, antall og kvalitet av kontaktpunktene avgjør de elektriske egenskapene til en kontakt [11]. I kabelskjøter kan en kontakt etableres ved å enten presse eller skru på en skjøtehylse. Når dette gjøres er det viktig at å sørge for at det blir nok kontaktpunkter. I masteroppgaven har det blitt laget skjøtehylser av aluminium som har blitt skrudd på. Eksempler på hylser er vist i Figur 9 [10].



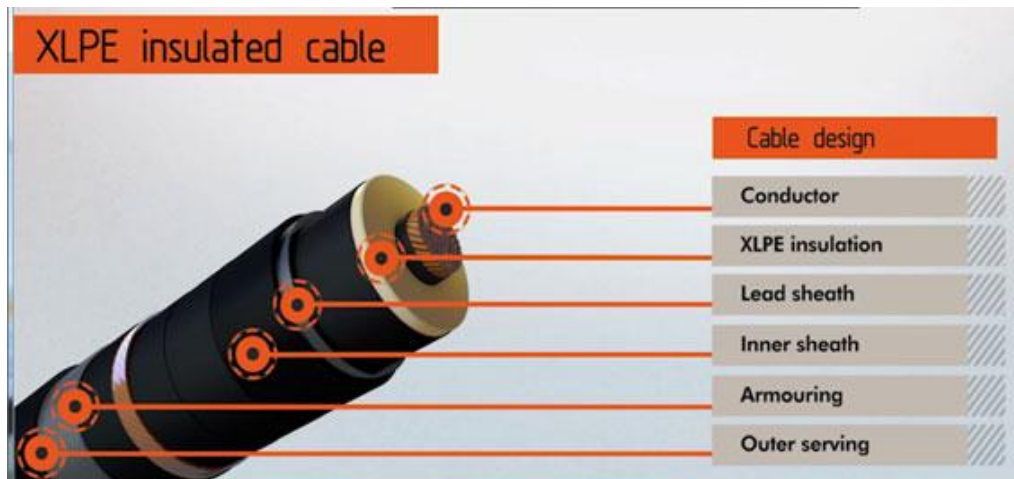
Figur 9: Bildene viser 2 ulike typer hylser. Bildet til venstre viser hylser som må presses på, mens de to andre bildene viser skjøtehylser som må skrues på. Bildet i midten viser hylsen som har blitt laget i forbindelse med masteroppgaven.

Å skape nok kontaktpunkter når to ledere presses eller skrues sammen er sjeldent vanskelig å oppnå. Å klare og beholde en lav resistans og god kvalitet på koblingene over hele driftstiden ( $\sim 30 - 50$  år), kan derimot være en mye større utfordring [11]. Noe av det som gir størst påkjenning på hylsene er blant annet varierende last. Med varierende last, følger varierende temperatur i kabelskjøten, som igjen fører til utvidelse og sammentrekning av kabelen. Dersom kabelen er utsatt for fuktige omgivelser, kan vanninntrenging oppstå, og dette kan forårsake korrosjon av skjøtehylsene.

## 2.3 PEX-isolasjon

I denne masteroppgaven har det blitt brukt PEX-kabler med aluminiumsleder, med et ledertverrsnitt på 95 mm<sup>2</sup>. Tabell 5 viser noen av de dimensjonerende dataene for kabelen som har blitt brukt.

En kabel består hovedsakelig av komponenter som: leder, isolasjon, ytre og indre halvledere, blykappe, armering og ytre lag [12].



Figur 10: Bildet viser en typisk oppbygging av en PEX-kabel [12].

I Norge er det tverrbundet polyetylen (PEX) som er det mest brukte isolasjonsmaterialet i høyspenningskabler. PEX-kabler lages gjennom en vulkaniseringsprosess. For at materialet ikke skal smelte dersom temperaturen overgår smeltepunktet lages det kjemiske koblinger mellom molekylene i polyetylen (PE). Dette gjør at materialet beholder en viss del av de mekaniske egenskapene selv under smeltetemperatur, og at en maksimal driftstemperatur på 90 °C er tillatt og ofte brukes som internasjonal norm [5]. Til sammenligning er maksimal tillatt driftstemperatur for polyetylen 70 °C [5].

Under produksjon av kabler er det vanskelig å unngå inntrengning av støvpartikler i isolasjonsmaterialet. Dette kan skape hulrom i isolasjonen og vil svekke materialet. Hulrom i isolasjonsmaterialet kan igjen føre til partielle utladninger. Dette blir utdypet i kapittel 2.3.4.

Tabell 5: Tabellen viser noen dimensjonerende data for PEX-kablene som har blitt brukt i denne masteroppgaven.

U <sub>0</sub> – nominell fasespenning, r.m.s.	12 kV
Diameter leder	11.4 mm
Isolasjonstykkelse	3.4 mm
Ytre diameter over isolasjonen	19.5 mm



## 2.3 Aldringsmekanismer

De viktigste aldringsfaktorene som påvirker kabelsystemer i tørre omgivelser er elektriske, som for eksempel partielle utladninger eller elektrisk trevekst. Dette kan blant annet oppstå på grunn av urenheter i isolasjonsmaterialet. Ved noen spesielle forhold kan også termisk aldring ha en betydelig påvirkning [13]. I fuktige omgivelser er det spesielt vanninntrenging som spiller en stor rolle på aldringsprosessen, da dette blant annet kan føre til korrosjon av hylser eller vanntrevekst.

IEC definerer aldring av høyspent isolasjonssystemer som [6];

*«Irreversible deleterious change to the serviceability of insulation systems. Such changes are characterised by a failure rate which increase with time».*

Oppgaven har hovedfokus på PD-målinger, men siden laboratorieforsøkene skal gjennomføres ved høy temperatur er det stor sannsynlighet for at material i skjøtene vil oksidere, spesielt for skjøtene som skal påtrykkes en konstant høy temperatur. I tillegg til oksidasjon av material og partielle utladninger som kan oppstå, kan kablene bli delaminert. Disse tre aldringsmekanismene vil bli forklart videre, og det er også viktig å nevne at alle disse mekanismene henger sammen og kan ha en påvirkning på hverandre.

### 2.3.1 | Oksidasjon

Når isolasjonsmaterialet i kabler reagerer ved kontakt med luft har det oppstått en kjemisk reaksjon. Denne reaksjonen er bedre kjent som oksidasjon.

Når kabler og kabeltilbehør blir utsatt for høye temperaturer (termisk aldring) kan aldringsprosessen til komponentene akselereres. Ved for høye temperaturer vil polymer-materialene i kabler og skjøter oksideres, og dette kan føre til at materialet blir sprøtt [14, 15]. Normalt sett vil det også vises en fargeforandring i materialet. For å redusere oksidasjonsprosessen blir det tilsatt antioksidanter i materialet [5]. Dette blir gjort fordi polymer-materialene blir sprø ved oksidering og det vil da kunne oppstå små sprekker i materialet, der partielle utladninger kan oppstå. Dersom partielle utladninger oppstår kan dette raskt føre til alvorlige feil eller havari av kabelen.

### 2.3.2 | Deformasjon

I denne oppgaven skal testobjekter med PEX-isolasjon påtrykkes 150 °C, som er godt over maksimal driftstemperatur. PEX-kabler har en begrenset driftstemperatur på 90 °C på grunn av den ulineære termiske ekspansjonen som vil oppstå i PEX materialet [16]. Ved å påtrykke en så høy temperatur vil materialet ekspandere, og dette kan over tid ødelegge kabelens egenskaper.

### 2.3.3 | Delaminering

I takt med varierende belastning på kabelsystemet vil kabelen bli utvidet og sammentrukket, det vil altså oppstå en termisk ekspansjon. Dette kan føre til forringelse av isolasjonsmateriale (delaminering), og skjer som oftest på grunn av oksidasjon som har gjort materialet sprøtt [5].

### 2.3.4 | Partielle utladninger

En av de viktigste feil- og aldringsmekanismene som kan oppstå i en PEX-kabel er partielle utladninger [17]. Partielle utladninger er små elektriske utladninger i kabelisolasjonen. Utladningene har svært kort varighet (et par nanosekunder), men kan oppstå hyppig om betingelsene er tilstede. Det er to forhold som må inntreffe samtidig for at partielle utladninger skal oppstå. Det trengs et høyt nok elektrisk felt ved for eksempel et hulrom eller spisse kanter, og et startelektron. Det elektriske feltet vil akselerere startelektronet, og dette vil starte et lokalt elektronskred. Partielle utladninger måles vanligvis i picocoulomb [pC].

IEC definerer partielle utladninger som [18]:

*«Partial discharge (PD) is localized electrical discharge that only partially bridges the insulation between conductors and which can or can not occur adjacent to a conductor. Partial discharges are in general a consequence of local electrical stress concentrations in the insulation or on the surface of the insulation. Generally, [...] partial discharges are often accompanied by emission of sound, light, heat and chemical reactions.»*

Det skiller ofte mellom tre ulike typer utladninger:

1. Indre utladninger (utladninger i hulrom eller elektriske tredannelser)
2. Koronautladninger
3. Overflateutladninger

Koronautladninger er utladninger som oppstår ved spisse kanter i isolasjonen. Utladningene vil oppstå ved påtrykte spennings toppverdi, både ved positiv og/eller negativ polarisering. For å unngå koronautladninger kan det settes på koronaringer/kuler på utsatte deler slik at det elektriske feltet jevnes ut.

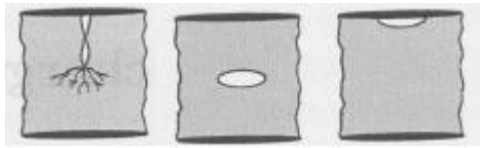
Overflateutladninger opptrer langs dielektriske grensesnitt der et sterkt nok tangentielt felt er til stede. Mønstrene som overflateutladninger danner baserer seg på Lichtenberg-figurer. Disse figurene forekommer når en spiss stav plasseres ved den spenningsatte overflaten til et dielektrikum. Overflateutladninger opptrer ofte på endetermineringene [19].



Figur 11: Bildet viser hvordan mønstrene til overflateutladninger danner seg. Mønstrene baserer seg på Lichtenberg-figurer [19].

Det vil videre fokuseres på indre utladninger der utladningene opptrer i hulrom, da dette anses som mest relevant for oppgaven.

### Hulromsutladninger



Figur 12: Ulike typer hulrom. Fra venstre; 1) Hulrom fra elektrisk tredannelse 2) Isolert hulrom 3) Hulrom avgrenset av elektrode [19].

Under produksjon av kabler er det vanskelig å forhindre støvpartikler fra å trenge inn i isolasjonssystemet. Disse partiklene kan inneholde fuktighet eller gass og skape hulrom.

Dersom hulrommet har en sfærisk form kan det maksimale elektriske feltet uttrykkes [20]:

$$E_{hulrom} = \frac{3 \cdot \epsilon_{r,isolasjon}}{1 + 2 \cdot \epsilon_{r,isolasjon}} \cdot E_{isolasjon} \quad (3)$$

Hvor  $E_{isolasjon}$  er feltstyrken i isolasjonen uten hulrom tilstede og  $\epsilon_r$  er den relative permittiviteten av materialet til isolasjonen.

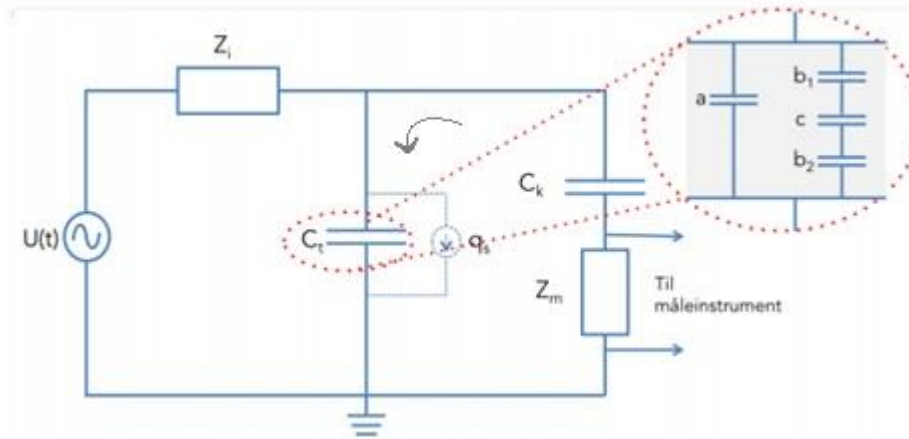
For et flatt hulrom som står vinkelrett på det elektriske feltet, blir feltet [20]:

$$E_{hulrom} = \epsilon_{r,isolasjon} \cdot E_{isolasjon} \quad (4)$$

Ligning (3) og (4) viser at det elektriske feltet vil være høyere i hulrommet enn i isolasjonen. Når det elektriske feltet blir så høyt at det overgår den dielektriske holdfastheten, vil utladninger forekomme. Holdfastheten avhenger, ifølge Paschen kurven, av dimensjonen på hulrommet og gasstrykket ved en gitt temperatur, og vil derfor variere [20]:

### ABC-ekvivalenten

En kjent og mye brukt metode for å finne størrelsen på hulromsutladningene er «abc-ekvivalenten». Denne metoden er en veldig forenklet metode for å beskrive hva som skjer når PD oppstår. Nedenfor er det vist en skjematisk skisse av et standard måleoppsett for PD og abc-ekvivalenten.



Figur 13: Skjematisk skisse av måleoppsett for PD og abc-ekvivalenten [21].

$$b < c \text{ og } c \ll a \quad (5)$$

Når spenningen som påtrykkes over hulrommet overskrider holdfastheten vil det oppstå PD. Da vil kapasitansen  $c$  helt eller delvis bli utladet, og spenningen vil falle fra startspenning,  $U_{s0}$ , ned til en «restspenning»,  $U_{r0}$  [6]. Koblingskondensatoren,  $C_k$ , vil så overføre en ladning,  $q_a$ , til  $c$  for å utjevne spenningsfallet. Ladningen  $q_a$  blir kalt tilsynelatende ladning [20].

Ladningen som overføres for å utjevne spenningsfallet er gitt ved differansen mellom startspenning og restspenning:

$$\Delta U = U_{s0} - U_{r0} \quad (6)$$

Det er altså ladningen som må overføres til testobjektet for å jevne ut spenningsfallet som måles. Ladningen som overføres i kretsen vil være en liten transient strøm,  $\Delta i$ . Forholdet mellom ladningen  $q_a$  og den transiente strømmen  $\Delta i$  kan vises ved:

$$q_a = \int \Delta i \cdot dt = \Delta U_t \cdot a \quad (7)$$

Der  $a$  representerer kapasitansen til hele testobjektet, gitt antakelsene i likning (5).

### Måling av partielle utladninger i felt

For å studere tilstanden til en komponent kan det blant annet gjøres målinger av partielle utladninger, dielektrisk respons og visuell inspeksjon [6]. I denne oppgaven fokuseres det på måling av partielle utladninger, og dette kan gjøres enten online eller offline. Testing både online og offline kan lokalisere feil.

Ved testing offline blir endetermineringene koblet fra og en separat strømforsyning kobles til. Det kan benyttes flere ulike metoder for å måle partielle utladninger, og noen av de vanligste metodene som kan anvendes er presentert i Tabell 6 [22];

Tabell 6: Metoder for måling av partielle utladninger [22].

<b>Metoder for måling av partielle utladninger</b>	
VLF (Very Low Frequency)	0,01 Hz – 0,1 Hz
OWTS (Oscillating Wave Test System)	20 Hz – 300 Hz
Driftsfrekvens	50 Hz eller 60 Hz

Ved å installere sensorer på termineringene til kabelen kan det kjøres tester online. Fordelen med denne teknologien er at testingen skjer under normale driftsforhold og det derfor ikke påløper kostnader for tiden kabelen ville vært koblet fra [6].

Ved offline-testing kreves det at kabelen er isolert og koblet fra nettet. Når kabelen er koblet fra, kan det kobles på en separat spenningskilde til systemet. Med denne metoden kan tenn- og slukkespenningen finnes. Karakteristikkene til de partielle utladningene vil også endre seg i takt med varierende spenning. Ved å studere disse karakteristikkene nærmere kan visse typer feil finnes [23].

### Kalibrering

For at målingene av PD skal være nøyaktig og riktig må testutstyret kalibreres. For å kalibrere kretsen må den samme spenningsendringen som kommer av PD finnes over testobjektet. Dette kan gjøres ved å injisere en kjent ladning over terminalene på testobjektet. Ved å måle responsen kan kalibreringsfaktoren  $k$  finnes. Denne kalibreringsfaktoren kan så brukes for å finne tilsynelatende ladning  $q_a$  [6]:

$$q_a = k \cdot U_m \quad (8)$$

Der  $U_m$  er den målte spenningen over måleimpedansen  $Z_m$ .

For hver gang kretsen endres må det gjøres nye kalibreringer, for å være sikker på at målingene blir nøyaktig. Ved måling av PD kan størrelsen til utladningene finnes, samt hvor på fasen de vil inntreffe. Delutladninger i hulrom vil ofte finnes ved stigende og fallende flanke [17].

### Tenn- og slukkespenning

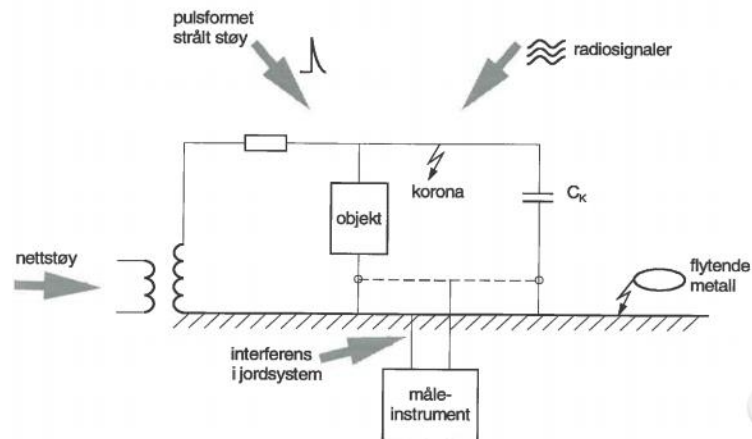
Når spenningen over hulrommet økes, vil spenningen til slutt nå et kritisk nivå der PD vil oppstå. Denne spenningen kalles tennspenning (PDIV). Ved å gradvis senke spenningen under tennspenningen til utladningene opphører, kan slukkespenningen (PDEV) finnes [17].

Temperatursvingninger vil gi endringer i materialet i testobjektet på grunn av termisk ekspansjon. Dette gjør at PD-aktiviteten også vil variere med tiden. Det er ikke gitt at PD vil oppstå ved hver måling. Dersom det ikke er noen startelektroner tilstede vil ikke dette kunne skje. For at resultater og målinger skal bli korrekte må det derfor måles over en lang nok

tidsperiode. I denne oppgaven har det blitt gjort målinger på testobjekter som både har blitt utsatt for en konstant temperatur og lastsyklet.

### Støy

Det kan under måling av PD oppstå støy som ikke forekommer fra testobjektet. Den type støy regnes som bakgrunnsstøy. Mye bakgrunnsstøy vil sette begrensninger for hvor sensitiv PD-målingene blir [6]. Typiske støykilder kan være:



Figur 14: Illustrasjon av ulike typer støykilder [17].

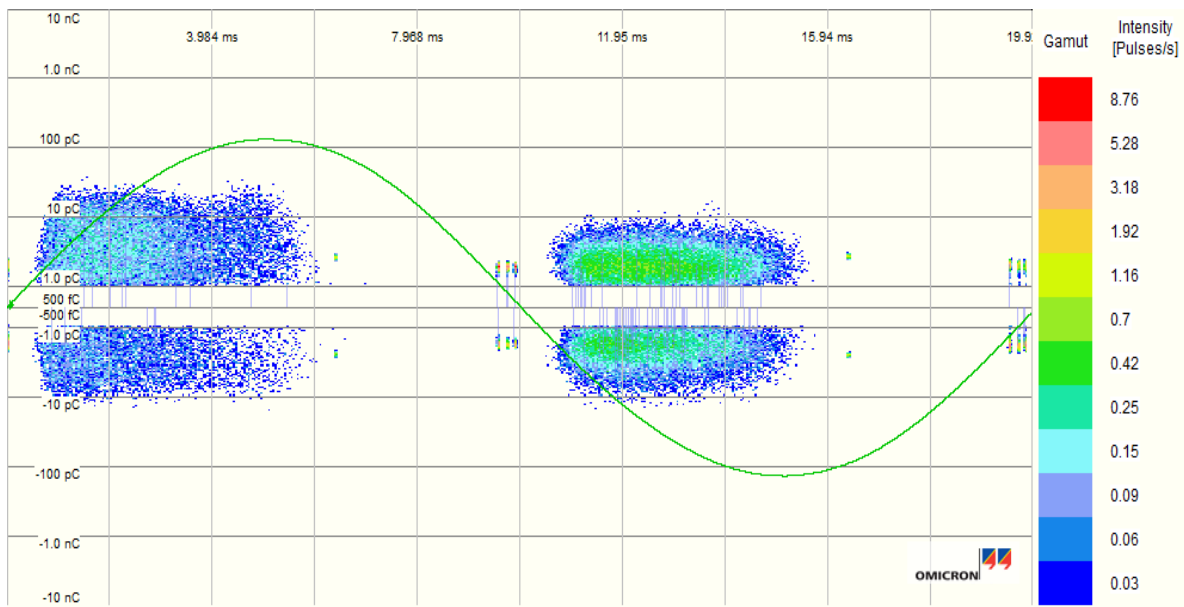
- Pulsformet støy
- Radiobølger
- Flytende potensiale (ledende partikler)
- Interferens i jordsystemet til måleinstrumentet
- Nettstøy (spenningskilde)
- Koblingskondensator

## 2.4 Analyse av PD-målinger

De utførte PD-målingene ble streamet og konvertert til lesbare MATLAB-filer. Under måling blir det lagret store mengder data, derfor ble det valgt å gjøre opptak på 1 minutters intervall for å begrense datamengden. Ved å bruke et MATLAB-skript kan informasjon om ladning, fase og spenning hentes ut. Skriptene som har blitt brukt er lagt ved som Vedlegg B, og noen av metodene for å presentere resultatene på er kort forklart i de følgende delkapitlene.

### 2.4.1 | Phase Resolved Partial Discharge Analysis, PRPDA

Resultatene fra målingene kan presenteres som faseoppløst PRPDA-plot, hvor ladningenes posisjon og størrelse blir vist. Et PRPDA-plot viser også hvor utladningene oppstår oftest ved å bruke fargekoder, som vist i Figur 15. Partielle utladninger vil altså opptre hyppigere der fargen er mer grønnlig.



Figur 15: PRPDA-plot. Bildet er tatt ved 30 kV hvor temperaturen ved lederen er 150 °C.

De ulike utladingstypene kan kjennes igjen ved at de vil opptre ved ulike posisjoner i PRPDA-plottet. Hulromsutladninger forventes å opptre ved stigende og/eller fallende flanke på sinuskurven, mens koronautladninger opptrer ved høyeste topp- og bunnverdi på sinuskurven.





# 3 Eksperimentelt

*En stor del av masteroppgaven har gått ut på å lage kabelskjøtene som har blitt brukt til laboratorieforsøk, og det vil derfor gås grundig gjennom i dette kapittelet hvordan de har blitt laget.*

*Hvilke målemetoder som har blitt benyttet og hvordan prosedyren for målingene har blitt gjennomført blir også forklart i dette kapittelet.*

## 3.1 Innledning

Det ble laget fire skjøter til masterprosjektet. Skjøt #1 ble brukt for å teste og kalibrere laboratorieoppsettet, og for å finne egenskapene til kabelskjøten. Det ble koblet på temperatursensorer i ulike lag i skjøten for å se hva temperaturen ble ved å påtrykke en gitt strøm. Skjøt #2 ble elektrisk aldret og utført PD-målinger på. Denne skjøten ble lastsyklet, der én sykel tilsvarer en runde med oppvarming og nedkjøling. Skjøt #3 ble aldret i varmeskap under konstant påkjenning og utført PD-målinger på. Dette for å kunne sammenligne resultatene med skjøtene som ble lastsyklet. Skjøt #4 ble bløtlagt, elektrisk aldret ved konstant temperatur og utført PD-målinger på. Skjøt #4 ble bløtlagt for å kunne illustrere en kabel som ligger i en våt grøft.

Det ble i tillegg brukt en dummy-kabel fra prosjektoppgaven som det ble koblet temperatursensorer på, for å ha kontroll på temperaturene. Denne kabelen ble først testet før bruk i masteroppgaven, for å sjekke at termineringene fortsatt er PD-fri.

Før kabelskjøtene ble montert ble det kappet opp noen lengder av PEX-kabelen og laget termineringer for å måle om disse kunne lages gode nok på egenhånd. Det ble også kappet opp noen lengder for å prøve seg frem til hvordan kabelskjøtene kunne monteres på best mulig måte, og hvordan man enklest kunne komme seg inn til ledere og redusere tverrsnittet. Resultater er presentert i kapittel 4.

Det ble bestemt at testobjektene skulle påtrykkes en temperatur på 150°C. Dette fordi tidligere tester ved 180 °C har gitt for rask aldring av materialene [10].

## 3.2 Testobjekt

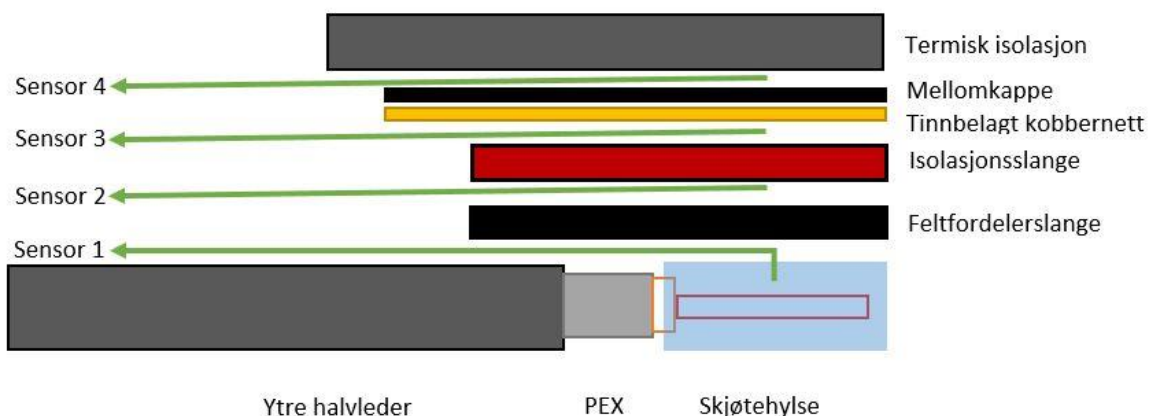
Raychem-skjøter ble bestilt inn og montert på alle testobjektene. Det ble laget et redusert ledertverrsnitt for å kunne påtrykke en lokal oppvarming. Dette gav en reduksjon i tverrsnittet fra 95 mm<sup>2</sup> til 38,5 mm<sup>2</sup>. Ved å redusere ledertverrsnittet på kablene var det ønskelig å oppnå en redusert kontakt eller økt kontaktmotstand mellom lederen og skjøtehylsen.

Tabell 7: Tabellen gir en enkel oversikt over de ulike testobjektene og hva som skiller de under preparering.

Testobjekt nr.	Forklaring	Preparering
1	Testkabelskjøt	Montering av skjøt med tilkoblet temperatursensorer
2	Temperatursykling	Montering av skjøt
3	Tørr	Montering av skjøt
4	Fuktet	Montering av skjøt og vanntett kar

Bortsett fra at det er tilkoblet temperatursensorer på testobjekt #1, er alle testobjektene montert likt. I tillegg har testobjekt #4 et vanntett kar rundt skjøten for å kunne aldre testobjektet i fuktige omgivelser.

For å kunne bestemme de fysiske egenskapene som trengs til aldringsprosessen av testobjekt #2 og under PD-målinger, ble testobjekt #1 brukt til testing for å finne aldringsbetingelsene. Testobjektet hadde flere temperatursensorer koblet til i ulike lag, og er vist i Figur 16.



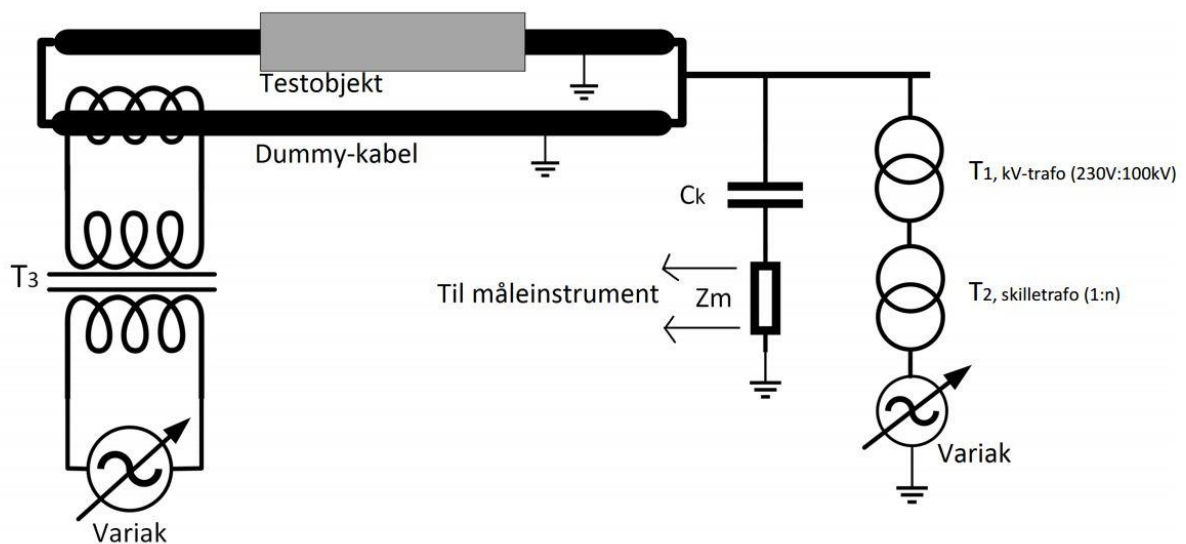
Figur 16: Figuren viser hvor de ulike temperatursensorene har blitt montert på i testkabelen.

Det ble festet en sensor på dummy-kabelen som skulle brukes videre fra prosjektoppgaven, for å ha kontroll på temperaturen i denne kabelen også. Det ble også festet en sensor i nærheten av testobjektene som kunne registrere romtemperatur. Et tangamperemeter ble også koblet til kretsen for å registrere den flytende strømmen i kretsen.

Det ble blant annet funnet;

- Tid for å nå 150 °C, som er ønsket aldringstemperatur
- Tid for å kjøle ned kableen til romtemperatur
- Hvilken strøm som trengs for å nå 150 °C
- Temperaturforskjell i de ulike lagene i skjøten

Oppsettet for aldringsprosessen ved lastsykling er illustrert i Figur 17. Figuren viser to eksterne kretser ved at det rundt dummy-kabelen er tilkoblet en strømtransformator. Denne transformatoren er igjen koblet til en egen variak slik at strøm og spenning kan styres hver for seg. I tilknytning til kondensatoren ( $C_k$ ), er det koblet til transformatorer, som igjen er koblet til spenningsvariaken.OMICRON-systemet som brukes til PD-målingene er koblet via kondensatoren, og blir nærmere forklart i kapittel 3.3. Ved måling av PD på de ulike skjøtene ble testobjektet, som vist i Figur 17, skiftet ut.



Figur 17: Skisse av laboratorieoppsettet. Ved hjelp av utstyr fra OMICRON måles det PD-aktivitet i prøveobjektet. Prøveobjektet er koblet til en koblingskondensator, som igjen er koblet til en transformator. Spenningen inn på transformatoren justeres ved hjelp av en variak. På dummy-kabelen er det koblet til en strømtrafo. Strømmen inn på trafoen styres ved hjelp av en variak. Ved måling av PD på de ulike skjøtene ble testobjektet skiftet ut.

På kabelskjøtt #4 (som skulle bløtlegges) måtte det flere forsøk til for å klare å tette karet som ligger rundt skjøten. Det ble først gjort forsøk med krympeslanger på hver ende av karet, men disse ble ødelagt etter kort tid. Trolig fortsatte strømmen å krympe ved den høye temperaturen i varmeskapet og sprakk derfor opp, som vist i Figur 18. Det kan også ses at det ble ekstra press på strømmen rundt der metallet er festet på (se rød pil i Figur 18), da karet har smeltet litt rundt festet. Dette har nok også hatt en innvirkning på at strømmen sprakk opp.



Figur 18: Bildet viser krympestrømpe som har sprukket opp under forsøk på å gjøre karet vanntett.

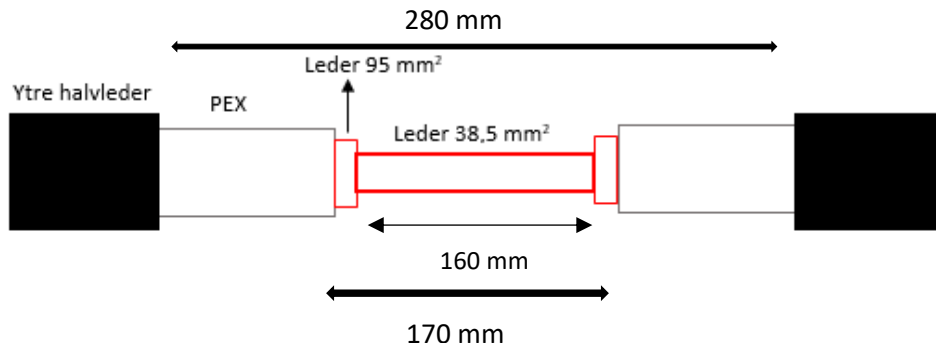
Etter to forsøk med å bruke en krympestrømpe, ble det prøvd å tette karet med FEP-materiale. FEP står for Fluor Etylen Propylen og skal tåle høye temperaturer. Da materialet ikke krympet nok rundt karet og kabelskjøten, ble det testet å bruke vulkaniserende teip ved endene, av samme typen som brukes for å lage endetermineringer. Det ble først lagt en liten bit med vulkaniserende teip i varmeskapet for å sjekke om de ville smelte ved 150 °C. Det ble ikke tilfellet, og det ble derfor surret mange lag med denne teipen for å sikre at karet ikke skulle lekke.

Karet som ble brukt er et Lexanrør. Dette røret ble brukt fordi det tåler høye temperaturer, og siden det er gjennomsiktig kan man enkelt se om det trengs påfyll av vann.

Ved 150 °C vil naturlig nok vannet fordampe. For å holde på vannet så lenge som mulig ble åpningen der kobbernettet gikk ut av karet og åpningen for å fylle på vann tettet med aluminiumsteip. Teipen hadde mye klister som gjorde at den festet seg godt rundt karet, men samtidig var enkel å ta av for å etterfylle vann. Etterfylling av vann skjedde minst to ganger daglig.

### 3.2.1 | Preparering testobjekt

Preparering av testobjektene er gjort i henhold til installasjonsbeskrivelsen *Raychem RTK-SIP-B/LEL 1167781*. Først ble et område på 280 mm midt på kabelen fjernet for ytre halvleder. Deretter ble isolasjon samt indre halvleder fjernet fra et område på 170 mm, for å nå inn til lederen. Ut i fra installasjonsbeskrivelsen skulle så en lengde på maksimum 160 mm av lederen reduseres på 12 kV kabler med ledertverrsnitt på 95-185 mm<sup>2</sup>.

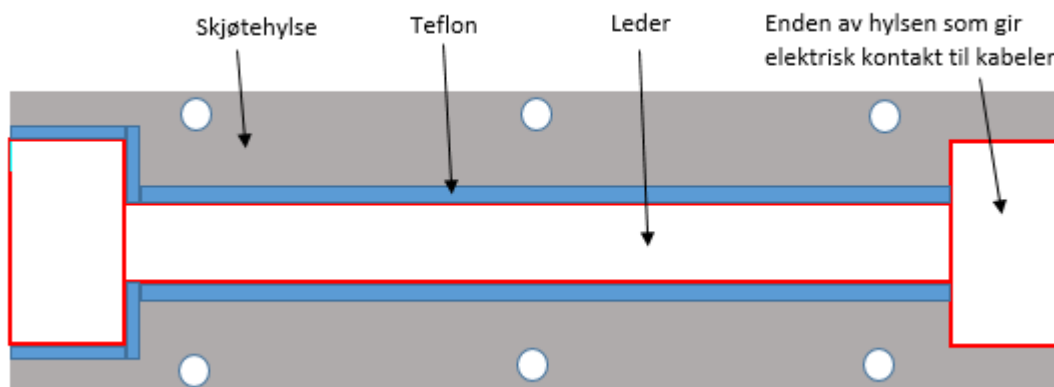


Figur 19: Figuren viser avstander mellom de ulike delene under reduksjon av ledertverrsnitt.

Rundt det reduserte tverrsnittet ble det lagt et lag med teflon (PTFE), med tykkelsen 1 mm, før metallhylsen ble skrudd på. PTFE blir brukt fordi materialet tåler høye temperaturer, og for å unngå et økt tverrsnitt som ville oppstått dersom det hadde vært kontakt mellom lederen og hylsen. Teflonlaget ble lagt på slik at det hadde kontakt med lederen i den ene enden (se Figur 21). Dette for å forhindre strømgjennomgang i hylsen og sørge for at hele skjøten har et felt på samme nivå. Hylsene som har blitt brukt i masterarbeidet har vært av typen som skrues på og er vist i kapittel 2.2.3, Figur 9. For å ikke ha noen skarpe kanter ble hodet på skruen filt vekk. For mål og montering av skjøtehylse se Figur 20 og Vedlegg C.



Figur 20: Montering av hylse. Øverste bildet viser avstand mellom de ulike delene under reduksjon av ledertverrsnitt. Denne figuren er tatt fra en tidligere masteroppgave og gjengitt her siden dataene er de samme. Neste bilde viser lederen med redusert tverrsnitt. Så blir teflon lagt på før hylsen blir skrudd fast.



Figur 21: Figuren viser plasseringen av teflonlaget inni hylsen.

Før de ulike krympeslangene kunne krympes på måtte alle hulrom i hylsen fylles med gul mastik. Dette for å forhindre hulrom i skjøten, som kan føre til at partielle utladninger kan oppstå.

Den første slangen som ble krympet på er en feltfordelerslange. Denne slangen sørger for at det blir en jevn feltbelastning over hele skjøten. For at isolasjonsnivået skal opprettholdes ble det etterpå krympet på en skjermet isolasjonsslange. Deretter ble det viklet et lag med fortinnet kobbernett rundt den skjermede isolasjonsslangen. Til slutt ble det krympet på en mellomkappe som sørger for at vann ikke skal kunne trenge inn i skjøten, og for å bevare de mekaniske egenskapene til skjøten.

Ved krymping ble en propan gassbrenner benyttet etter anbefaling fra installasjonsbeskrivelsen. Alle de tre forskjellige krympeslangene ble krympet på hver for seg med propanbrenneren.

Alle stegene ble gjentatt for alle de 4 kabelskjøtene som ble laget. Når skjøtene var ferdig montert på ble kabelsko festet på i hver ende av kabelen, slik at kabelen enkelt kan kobles til laboratoriekretsen og ha en best mulig overgang. Kabelskoene ble presset på med en hydraulisk presser.

### **3.2.2 | Montering av utladningsfrie termineringer**

For å være sikkert på at PD ikke oppstår i termineringene er det viktig å lage disse gode nok. Dette gjøres på hver side av kabelen for å sikre at kabelen tåler de påkjenningene den blir eksponert for. Dersom termineringene ikke er gode nok vil det være vanskelig å skille om PD oppstår i termineringene eller skjøten.

For å lage termineringer måtte kabelen først strippest, som vil si å skjære vekk den ytre halvlederen. Når den ytre halvlederen skjæres vekk er det viktig å unngå kutt i isolasjonen. Da det viste seg at halvlederen satt veldig godt fast rundt isolasjonen ble det bestemt at en skrellemaskin skulle benyttes i stedet. Ved å bruke en skrellemaskin gjelder det å være forsiktig slik at kniven ikke tar for mye av isolasjonsmaterialet. Dersom det ikke blir en fin overgang mellom isolasjonen og halvlederen der skrellingen skal stoppe, legges det ca. 5 mm med halvledende lakk i overgangen for å unngå feltforsterkninger og at partielle utladninger kan oppstå. For å få en fin kant på den halvledende lakken brukes en teip for å maskere rundt hele kabelen. Denne teipen tas vekk når lakken har tørket.

Når kabelen er strippet, og eventuelt har fått et lag med halvledende lakk malt på, legges en feltstyrende duk rundt isolasjonen. Duken skal presses godt på for å unngå hulrom, og ha en overlapp på ytre halvleder på ca. 20 mm, og ca. 80 mm på isolasjonen.

En feltstyrende duk brukes for å jevne ut feltfordelingen som kan oppstå der isolasjon og ytre halvleder møtes (se kapittel 2.2.2). Dersom en slik feltfordeling oppstår og kabelen er omgitt av luft, vil det være stor sannsynlighet for at partielle utladninger oppstår.

Utenpå den feltstyrende duken surres det på en selvklebende isoleringsteip i seks lag. Denne teipen legges på for å tette de eventuelle hulrommene som har oppstått av den feltstyrende duken. Teipen legges fra halvledende side, og avsluttes på halvledende side. Til slutt festes den isolerende teipen med elektrikerteip, som vil vise skille mellom ledende og jordnet del av kabelen.

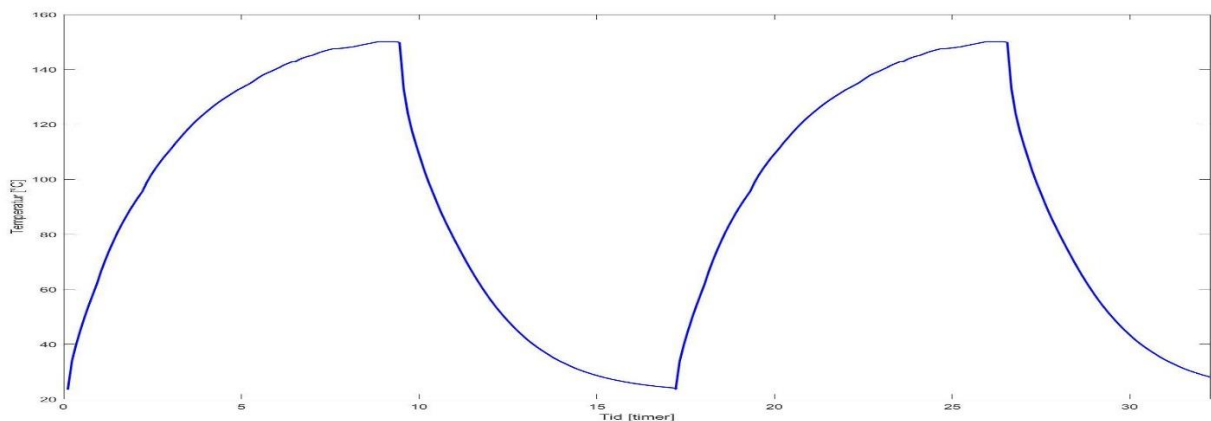
### 3.2.3 | Aldringsbetingelser

Tabell 8: Tabellen gir en enkel oversikt over de ulike testobjektene sine aldringsbetingelser.

Testobjekt nr.	Forklaring	Aldringsbetingelser
1	Testkabelskjøt	Temperatursykling for å finne betingelser for testobjekt #2 gjennomførelse av PD-målinger
2	Temperatursykling	Temperaturvariasjon mellom romtemperatur (~20 °C) og 150 °C ved lederen.
3	Tørr	150 °C
4	Fuktet	150 °C

Testobjekt #3 og #4 ble aldret ved å ligge i et varmeskap med konstant temperatur på 150 °C. Testobjekt #3 er kun i kontakt med luft og vil derfor aldres ved 150 °C som varmeskapet er innstilt på. Siden vann ikke vil bli varmere enn ~ 100 °C (det vil fordampe), vil kabelskjøten i fuktige omgivelser bli isolert på grunn av vannet, som vil si at selve skjøten blir aldret ved en temperatur på 100 °C – ideelt sett. Praktisk sett, var det vanskelig å få skjøten samt resten av kabelen til å ikke røre noen av kantene i karet, som vil si at skjøten berører omgivelser som kan bli 150 °C. Når kabelskjøten stod til aldring over natten hadde vannet fordampnet til dagen derpå, og har derfor blitt utsatt for en temperatur på 150 °C frem til det har blitt fylt på vann igjen. Derfor vil skjøten bli aldret mellom 100 °C og 150 °C.

Parallelt ble testobjekt #2 aldret ved å kontinuerlig varme opp og kjøle ned kabelen. For å være sikker på at det ble oppnådd en stabil temperatur på 150 °C i lederen, ble det lagt inn ekstra tid med konstant strøm, før testobjektet ble kjølt ned til romtemperatur. Dette er illustrert i Figur 22, der x-aksen viser tid i timer, mens y-aksen viser temperatur.



Figur 22: Figuren illustrerer oppvarming og nedkjøling av den temperatursykklede skjøten. X-aksen viser tid i timer, mens y-aksen viser temperatur i grader.



Ved å gjennomføre en slik aldringsprosess vil materialene i testobjektene aldres raskere, siden temperaturen er høyere enn maksimal driftstemperatur på 90 °C. Ved å variere belastningen, som det har blitt gjort for testobjekt #2, vil det oppstå en termisk ekspansjon, der kabelskjøten blir utvidet og deretter sammentrukket. Dette kan føre til delaminering og deformasjon av materialet.

I denne oppgaven er det målinger av PD som er i fokus. Testobjektene ble i utgangspunktet aldret i én uke av gangen, og deretter er det utført PD-målinger. Dersom resultatene fra målingene tilsa at det burde bli endringer i tidsintervallet mellom testing av kabelskjøtene, så ble det gjort endringer. Under måling påtrykkes alle testobjektene en belastning på ~ 230 A. Det er underveis gjennomført målinger ved ulike temperaturer under oppvarming og nedkjøling, som er vist i Tabell 9 og Tabell 10.

Tabell 9: Tabellen gir en oversikt over tidspunkt for PD-målinger under oppvarming av testobjektet.

<b>Oppvarming av testobjekt</b>				
Tid fra påtrykt belastning	<b>1 t</b>	<b>2,5 t</b>	<b>4,5 t</b>	<b>8,5 t</b>
<b>Skjøtehylse [°C]</b>	70	100	130	150
<b>Feltfordelerslange [°C]</b>	63	94	123	141
<b>Isolasjonsslange [°C]</b>	56	85	113	130
<b>Mellomkappe [°C]</b>	50	73	94	108

Tabell 10: Tabellen gir en oversikt over tidspunkt for PD-målinger under nedkjøling.

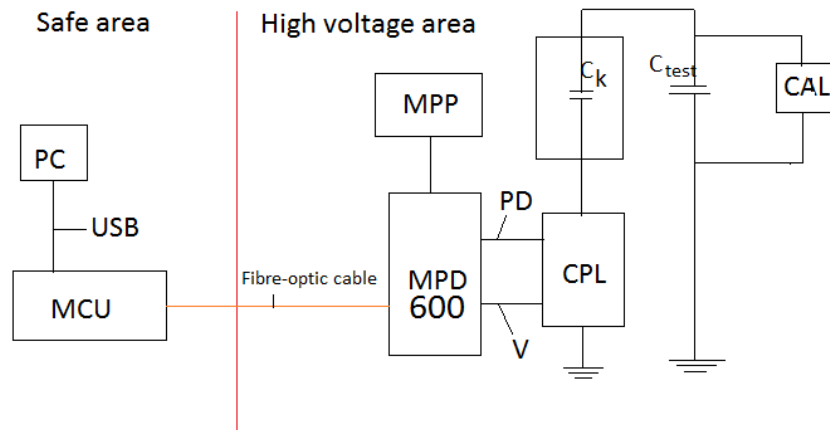
<b>Nedkjøling av testobjekt</b>				
Tid etter avslått belastning	<b>10 min</b>	<b>1t 10min</b>	<b>2 t</b>	<b>6,5 t</b>
<b>Skjøtehylse [°C]</b>	130	100	70	25
<b>Feltfordelerslange [°C]</b>	130	101	72	25
<b>Isolasjonsslange [°C]</b>	128	100	72	25
<b>Mellomkappe [°C]</b>	107	86	64	25

Målingene er som vist i Tabell 9 og Tabell 10 gjennomført ved romtemperatur (25 °C) 70 °C, 100 °C, 130 °C og 150 °C.

Det ble gjennomført målinger av partielle utladninger ved å bruke utstyr fra OMICRON. Før målingene startet ble testobjektene kalibrert ved hvert bytte av testobjekt. Dersom den injiserte ladningen ikke stemte overens med det som ble vist i OMICRON ble dette justert.

### 3.3 Eksperimentelt måleoppsett for detektering av delutladninger

For å kunne gjøre målinger av partielle utladninger ble OMICRON MPD600 benyttet. Samme metode ble benyttet i prosjektoppgaven, og er derfor gjengitt her.



Figur 23: Oversikt over hvordan OMICRON-systemet er koblet sammen. MPD 600 er koblet via en fiberoptisk kabel til en MCU-enhet som deretter er koblet til PC via USB. BNC-kabler kobler måleimpedansen (CPL) til MPD, som også har tilkoblet et batteri (MPP). CPL er deretter tilkoblet koblingskondensatoren  $C_k$ .

Fiberoptisk kabel kobles mellom MCU-enheten og MPD 600. MCU-enheten er videre koblet til en PC via USB. Batteripakken MPP kobles så til MPD-enheten og vil så blinke rødt for å signalisere at enheten er klar til å brukes. To BNC kabler brukes for å koble måleimpedansen CPL til MPD, slik at spennings- og PD-signaler kan overføres. Videre kobles CPL til en koblingskapasitans,  $C_k$ , og jordes skikkelig [24].

MPD600 blir kalibrert ved at en kalibrator kobles til oppsettet og satt på en gitt verdi som blir injisert mellom jord og høyspenningssiden i kretsen. Ved å sette inn samme verdi på programvaren som er lastet ned på PCen vil programvaren kunne regne ut forholdet mellom injisert ladning og den faktiske ladningen som strømmer i kretsen.

OMICRON er et system som er veldig sensitivt mot støy. Det settes derfor en støygrense i programvaren på datamaskinen, i dette tilfellet ble det stort sett brukt en grense på 2 pC, som vil redusere mengden data som registreres og må behandles. For å redusere støy i målingene ble det blant annet festet på koronaringer ved spisse kanter i laboratorieoppsettet. Det ble også gjort tiltak som å skru av ventilasjon og forsterkere i området da dette viste seg å lage mye støy i målingene. Det vil være vanskelig å bli kvitt all støy, da det arbeides med andre forsøk i nærheten.

I programvaren kan faseforskyvning legges inn og kompenseres for. Dette kan gjøres ved å ha en skarp gjenstand, f.eks. en ståltråd, festet på en del av testobjektet som er ledende, som vil skape et tydelig plott av koronautladninger på grafen. I utgangspunktet vil koronautladninger legge seg på topp eller bunn av sinuskurven, og dersom de ikke legger seg der vil det være en faseforskyvning. I programvaren kan det legges inn rutenett med tidsintervall slik at faseforskyvning enkelt kan leses av, legges inn og deretter bli kompensert for.

### 3.3.1 | Prosedyre for måling av delutladninger

For måling av partielle utladninger ble følgende prosedyre fulgt:

- Påtrykt spenning ble startet på 18 kV med 1 minuttts måleintervall. Spenningen ble økt i trinn på 1 kV.

I utgangspunktet er 1 minutt relativt kort tid, men tidligere tester etter montering av skjøtene viste at PD inntraff veldig raskt ved påtrykt spenning, derfor ble prosedyren gjennomført på denne måten. I tillegg ville det ikke vært mulig å gjennomføre forsøket innen rimelig tid dersom intervallet skulle vært enda lengre, da det tar så lang tid å varme opp og kjøle ned testobjektene. Det ville også blitt enda mer unøyaktig målinger med lengre intervall siden temperaturene raskt ble høyere eller lavere, under oppvarming og nedkjøling.

- Målingene ble gjennomført helt til PD oppstod, og dersom PD ikke skulle oppstå ble spenningen stoppet på 30 kV.

Spenningen ble stoppet på 30 kV fordi det vil være vanskelig å kunne si om PD vil oppstå i termineringene eller kabelskjøten over dette spenningsnivået.

- Ved funn av PD:
  - Den påtrykte spenningen ble angitt som tennspenning (PDIV).
  - Ved funn av PD ble et opptak streamet i 60 sek.
  - Videre ble spenningen redusert med et steg på 1 kV i 1 minuttts intervaller. Dette ble gjort helt til de partielle utladningene sluttet å opptre. Spenningsnivået der dette skjer er angitt som slukkespenning (PDEV).



## 4 Resultat og diskusjon

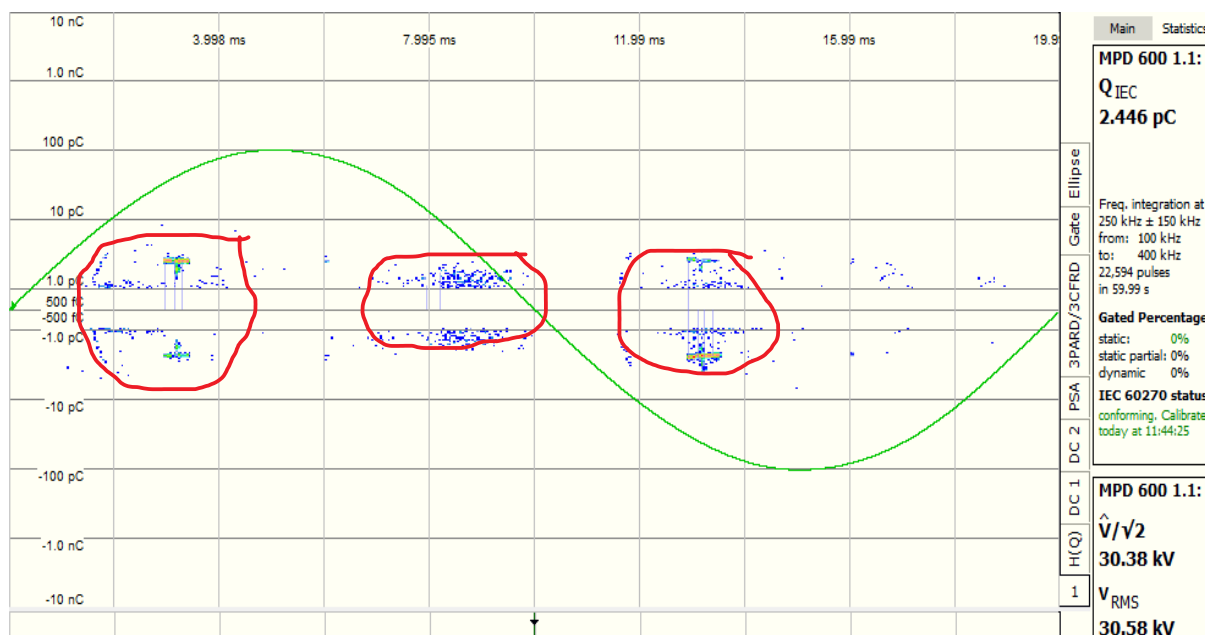
I dette kapittelet er de viktigste resultatene presentert og diskutert. På grunn av den lange tiden det tar å gjennomføre PD-målingene ble kun én kabelskjøt målt per dag. I utgangspunktet skulle PD-målingene gjennomføres etter like lang tid, men siden det tok ekstra lang tid å få karet til den fuktige skjøten tett, ble det noen variasjoner, i tillegg havarerte den ene kabelskjøten. Målingene ble gjennomført etter henholdsvis;

Tabell 11: Tabellen viser en oversikt over når de ulike forsøkene har blitt gjennomført i aldringsprosessen av testobjektene.

Kabelskjøt [#]	Forsøk 1 [t]	Forsøk 2 [t]	Forsøk 3[t]	Forsøk 4 [t]
Kabelskjøt 2	168	336	408	528
Kabelskjøt 3	168	336	408 + disseksjon	-
Kabelskjøt 4	168	240	360	-

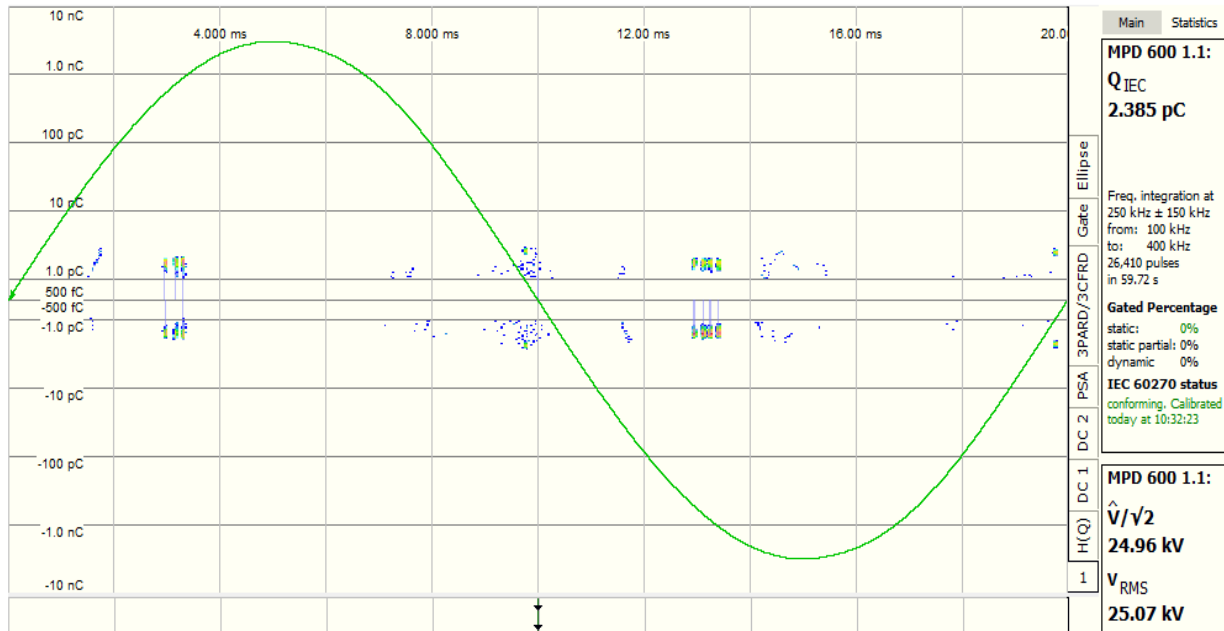
### 4.1 Innledende målinger

Det er vanlig å kunne påtrykke en spenning opp til  $2xU_0$  (nominell systemspenning), som i dette tilfellet vil si at spenningen burde kunne kjøres opp til 12 kV uten at PD oppstår. Det vil også si at termineringene som lages på skjøtene burde være PD-fri opp til minst 12 kV. På kablene er det montert skjøter som kan monteres på både 12- og 24 kV kabler, og i begge tilfeller burde skjøtene være PD-fri opp til 24 kV.



Figur 24: PD-plott ved test av terminering. Plottet viser at termineringen var PD-fri opp til 30,5 kV. Det registreres kun støy i plottet (markert med røde sirkler).

Figur 24 viser en av endeterminering som ble laget. I dette tilfellet var termineringen PD-fri opp til 30,5 kV. Det er kun noe støy som registreres. Støyen ble registrert på grunn av et annet nærliggende forsøk, og kunne enkelt vært filtrert vekk ved å sette støygrensen i OMICRON til noe høyere da målingen ble gjennomført.



Figur 25: PD-plott fra test av dummy-kabel. Kabelen var PD-fri opp til 25 kV, som er innenfor kravet.

Figur 25 viser PD-måling av dummy-kabelen som ble brukt i prosjektoppgaven og at termineringene fortsatt tåler over 24 kV. Det er kun registrert litt støy med høyeste verdi på 2,4 pC. Målingen viste at dummy-kabelen kunne brukes videre i masterarbeidet.

## 4.2 Temperatursykling til 150 °C på leder

### 4.2.1 | Aldringsbetingelser funnet ved målinger på testobjekt #1

Det ble gjennomført flere runder med lastsykling på testobjekt #1 for å finne hvilken strøm som ville gi 150 °C. Det ble funnet at en strøm på ~ 230 A vil gi en stabil temperatur på 150 °C ved leder. Tabell 12 viser de ulike temperaturene i de ulike lagene i skjøten, når temperaturen i hylsen ligger på 150 °C.

Tabell 12: Tabellen viser temperaturforskjell i de ulike skjøtelagene fra test på kabelskjøtt #1. Det kan registreres en temperaturforskjell på 42 grader fra hylsen til mellomkappen.

Temperaturforskjell i de ulike skjøtelagene på testobjekt #1	
Skjøtehylsen	150 °C
Feltfordelerslange	141 °C ( $\Delta T = 9$ °C)
Isolasjonsslange	130 °C ( $\Delta T = 20$ °C)
Mellomkappe	108 °C ( $\Delta T = 42$ °C)

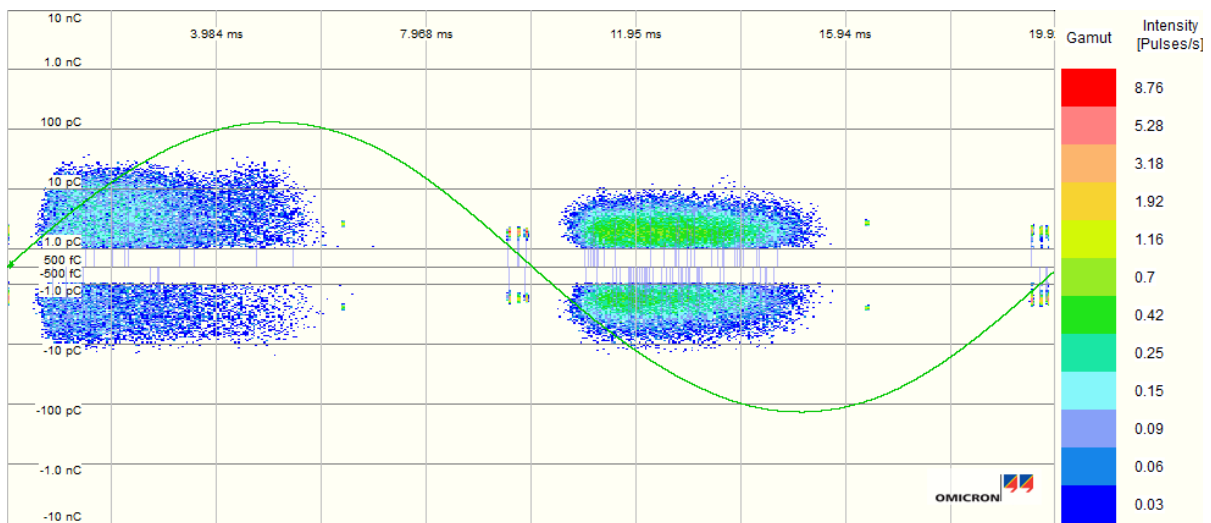
Tiden for å nå en stabil temperatur på 150 °C ble registrert til å ta 8,5 t, og for å nå romtemperatur igjen tar det 6,5 t etter at strømmen er skrudd av.

Det registreres at temperaturforskjellen fra inni skjøtehylsen til utenpå mellomkappen er relativt stor,  $\Delta T = 42 \text{ }^\circ\text{C}$ , så det kan forstås at noe av problematikken med kabelskjøter ligger i overoppheting av skjøtehylser.

I denne oppgaven har belastningen blitt skrudd av og på manuelt. For å ha en best mulig kontinuerlig sykling kan det være lurt til senere arbeid å få installert for eksempel labview, eller en annen funksjon slik at arbeidet ikke trengs og gjøres manuelt. Det vil kunne spare mye tid og arbeid.

## 4.2.2 | Testobjekt #2

Testobjekt #2 ble temperatursyklet. Det vil si at skjøten ble påtrykket en belastning (funnet fra målinger på testobjekt #1) som ville gi stabil temperatur ved lederen på 150 °C, for deretter å bli kjølt ned til romtemperatur. Før laboratorieforsøkene ble satt i gang ble skjøten PD-testet, og målt PD-fri opp til 32 kV. Resultat fra PD-måling før forsøkene ble igangsatt kan ses i Figur 26.

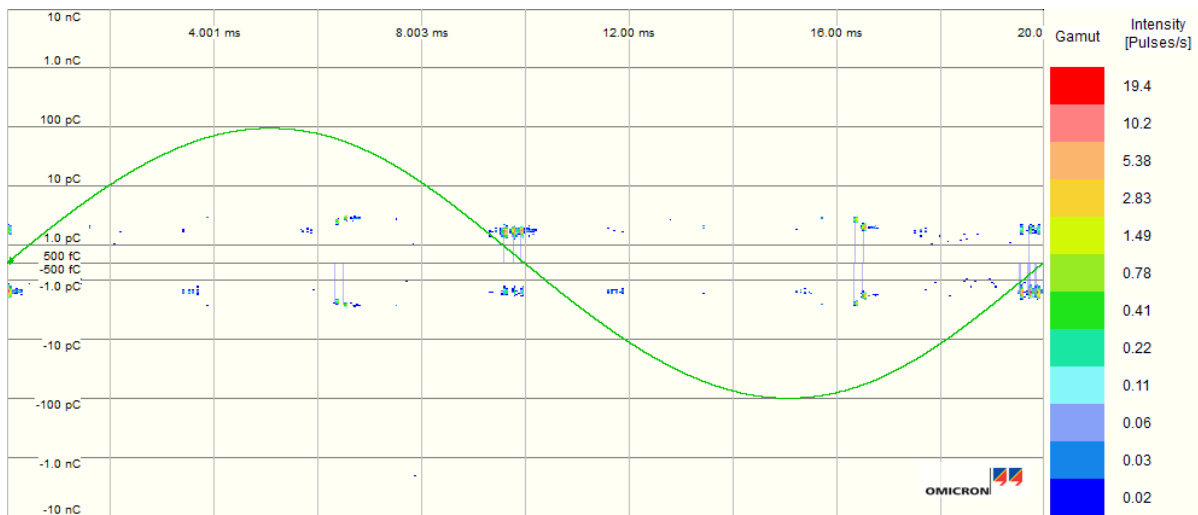


Figur 26: PD-plott fra måling på testobjekt #2. Testobjektet viste seg å være PD-fri opp til 32 kV.

Resultatet viser at utladningene opptrer ved stigende og fallende flanke, og kan derfor karakteriseres som hulromsutladninger. Figuren viser også at PD opptrer hyppigst i det grønne sjiktet ved fallende flanke. Det kan også registreres at støynivået er stilt inn på 1 pC, og det tilnærmet null støy som overstiger dette nivået.

## Forsøk 1

Forsøk 1 ble gjennomført etter 168 t. Målingene detekterte ingen partielle utladninger. Siden kabelen ble testet PD-fri opp til 32 kV kan dette bety at de utladningene som da oppstod kom i termineringene. Det kan skyldes hulrom i termineringene som har blitt jevnet ut etter termisk ekspansjon og lastsykling. En annen mulighet er at PD oppstod i skjøten, i et av lagene som har blitt krympet på. Dette kan skyldes at de ikke har blitt krympet på lenge nok for å unngå hulrom. Ved å påtrykke en belastning slik at skjøten blir varmet opp kan disse hulrommene ha blitt jevnet ut.



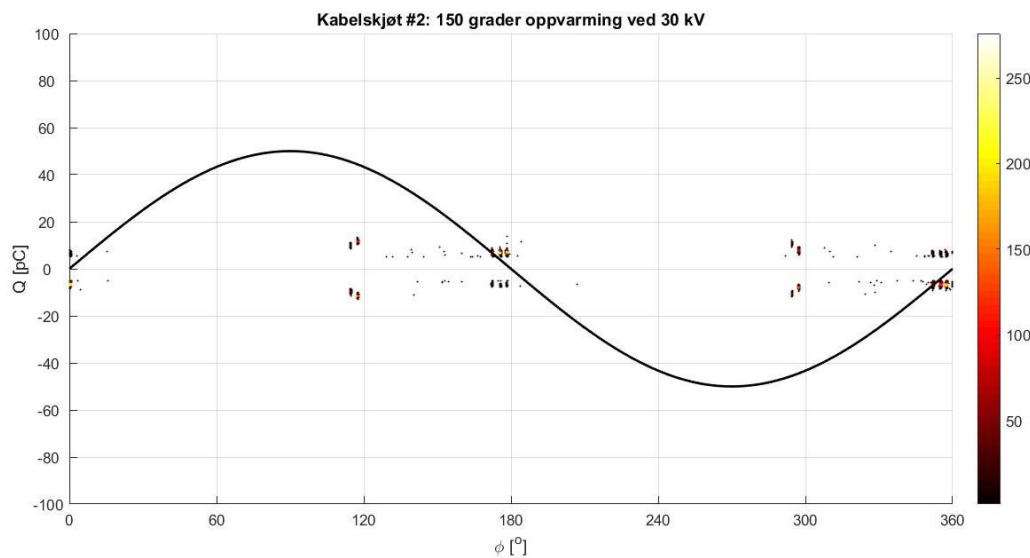
Figur 27: PD-plott fra forsøk 1 ved 150 grader på ledere ved henholdsvis 30 kV. Det registreres kun støy.

Figur 27 viser måling fra Forsøk 1 ved 30 kV ved 150 °C. Det oppstod ingen PD, og det kan kun registreres noe støy. De første ukene ved måling var det gjennomgående mye støy, spesielt under Forsøk 2 for testobjekt #2 og #3, ved nullgjennomgang på sinuskurven. Det ble gjort undersøkelser for å se om det var noen dårlig kontakt i laboratoriekretsen, men støyen var tilstede selv uten strøm flytende i kretsen. Det kan derfor tenkes at støyen kom fra et nærliggende forsøk.

## Forsøk 2

Forsøk 2 ble gjennomført etter 336 t. Da hadde skjøten blitt lastsykket i to uker. Målingene under forsøk to ble veldig forstyrret av støy. Det var spesielt ett nærliggende forsøk i laboratoriet som trolig har vært kilden til støy. Ved å filtrere vekk støyen ble målingene i Forsøk 2 ved alle temperaturene slik som i Figur 28, der det ikke oppstod noen partielle utladninger.



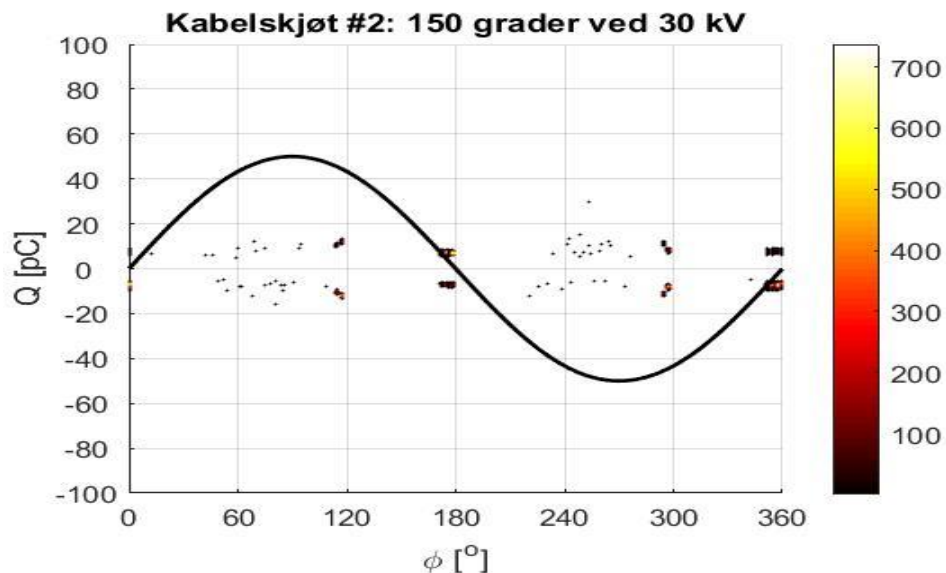


Figur 28: PD-plott fra måling under forsøk 2 ved henholdsvis 150 grader og 30 kV. Registreres kun litt støy.

Figuren viser måling fra 150 °C under oppvarming ved 30 kV. Det kan ses at testobjekt #2 fortsatt tåler belastningen den blir utsatt for etter 336 t.

### Forsøk 3

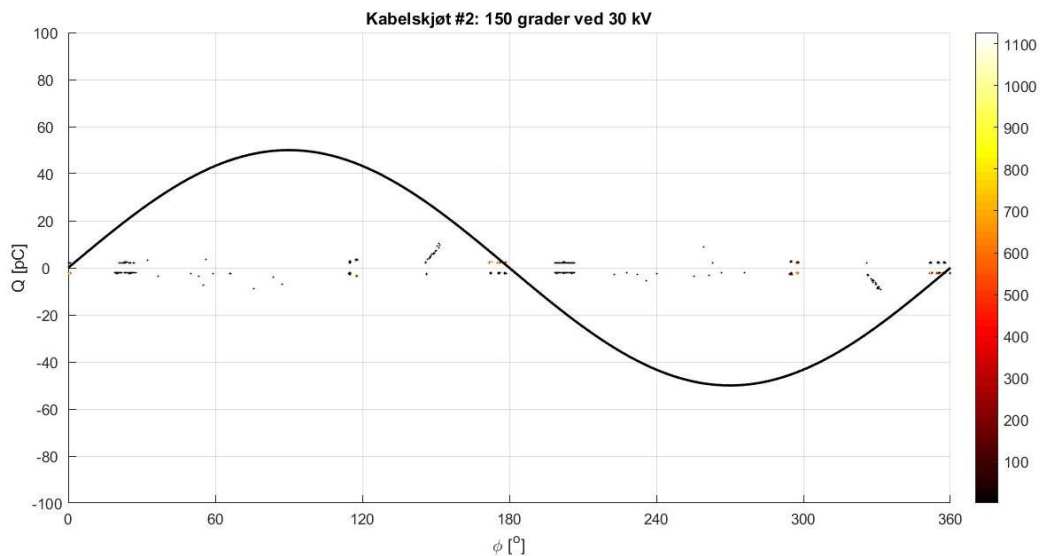
Forsøk 3 ble gjennomført etter 408 t. Dette tilsvarer 17 dager hvor testobjektet har blitt aldret, og resultatene viser at skjøten fortsatt tåler å bli temperatursyklet opp til 150 °C.



Figur 29: PD-plott fra måling under forsøk 3 ved henholdsvis 150 grader og 30 kV. Det registreres kun støy og ikke PD.

## Forsøk 4

Det siste forsøket gjennomført på testobjekt #2 ble gjort etter 22 dager aldring, som tilsvarer 528 t. Heller ikke under dette forsøket oppstod det partielle utladninger ved noen av målingene. Figur 30 viser måling fra 150 °C ved 30 kV.



Figur 30: PD-plott fra forsøk 4 ved henholdsvis 150 grader og 30 kV. Det registreres ingen PD, kun litt støy.

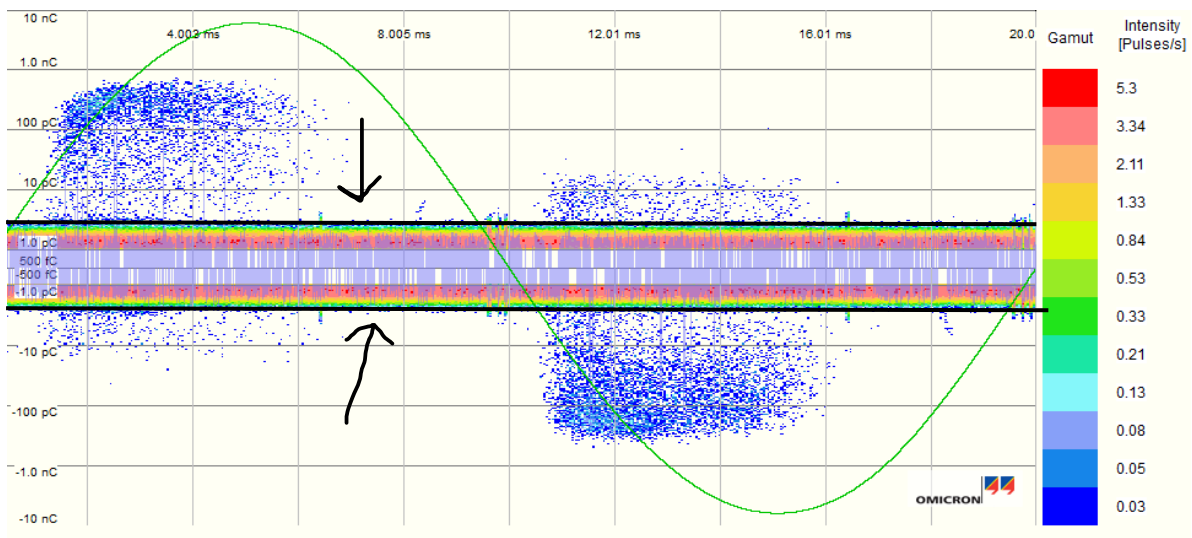
Som nevnt i innledningen av rapporten (kapittel 1.2) er PEX et sterkt materiale med gode mekaniske egenskaper, som blant annet gjør at kabler ikke vil smelte selv om temperaturen overstiger driftstemperaturen på 90 °C. Det kan tenkes at tiden mellom en avsluttet og påbegynt temperatursykel gjør at PEX-kabelskjøten klarer «å hente» tilbake sine opprinnelige mekaniske egenskaper og i den grad ikke vil bli historisk påvirket av tidligere lastsykler. En temperatur på 150 °C er en god del høyere enn normal driftstemperatur på 90 °C, og en skulle derfor tro at etter så mange dager med aldring ville aldringsprosessen ha akselerert betraktelig. Det kan også være at PD-målingene ville gitt utslag ved å aldre kabelskjøten over en litt lengre tidsperiode.

Siden målingene av de tre kabelskjøtene foregår over tre dager, vil det være to dager hvor kabelskjøtene ikke aldres. Dette kan også ha ført til at de mekaniske egenskapene gikk tilbake til det «opprinnelige», slik kabelskjøten var før aldringsprosessen. Det er likevel liten sannsynlighet for at kabelskjøten ikke er historisk påvirket av aldringsprosessen overhodet. «Pausen» i aldringsprosessen for kabelskjøt #2 som oppstår under målinger av de to andre kabelskjøtene samt at temperatursyklingen ikke starter så fort temperaturen ved lederen er kjølt ned, er begge to faktorer som kan sakke akselereringen av aldringsprosessen.

## 4.3 Konstant 150 °C

### 4.3.1 | Tørre omgivelser

Testobjekt #3 ble aldret under konstant temperatur på 150 °C i et varmeskap. Etter 168 t, 336 t og 408 t ble skjøten tatt ut fra varmeskapet og PD-testet. Før forsøkene ble satt i gang ble kabelskjøten utført PD-målinger på, og ble funnet PD-fri opp til 27 kV. Dette er vist i Figur 31, der PD vises som det blå på figuren og opptrer ved stigende og fallende flanke på den grønne sinuskurven.

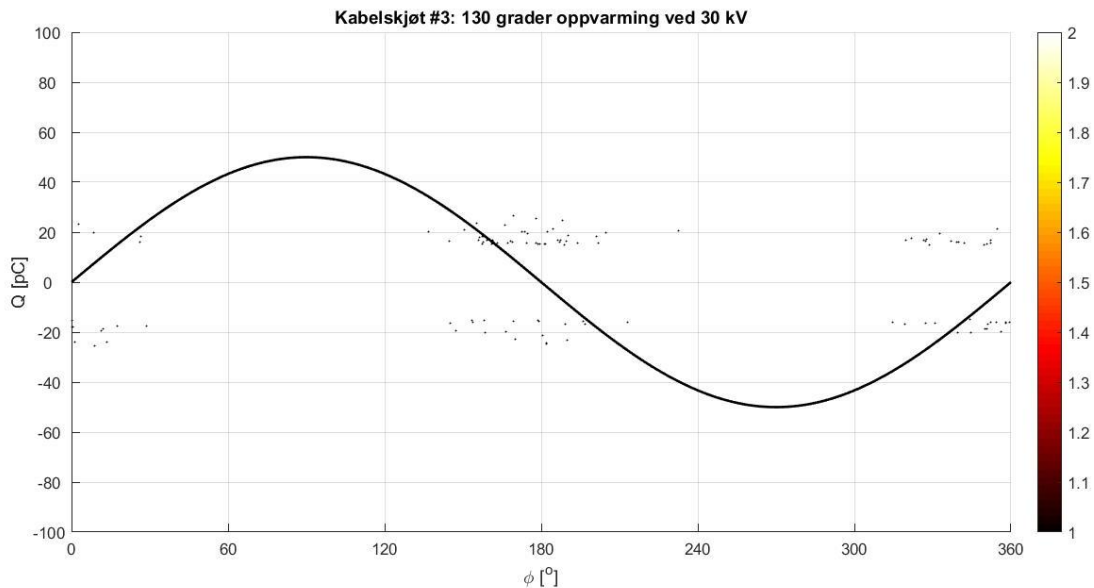


Figur 31: PD-plott fra test på kabelskjøt #3. Skjøten ble målt PD-fri til 27 kV. De sorte pilene registrerer hvor støygrensen etter hvert ble justert opp til.

Målingene fra før forsøkene ble satt i gang ble gjennomført uten å ta opptak. Derfor har ikke støyet som oppstår blitt fjernet. Det kan i tillegg registreres at nivået for støy ligger på 1 pC, og det ble etter hvert justert opp til 2 pC (markert i figuren med sorte linjer) for å unngå mye unødvendig datainnsamling av støy.

## Forsøk 1

Forsøk 1 ble gjennomført etter 168 t. Det var allerede tydelige tegn til oksidasjon på det tinnbelagte kobbernett, der nettet var tydelig misfarget og så nesten brent ut. PD-målingene viste derimot, i likhet med kabelskjøt #2, ingen tegn til partielle utladninger ved noen av målingene. Et eksempel er vist i Figur 32 fra måling ved 130 °C ved 30 kV. Det registreres kun litt støy rundt nullgjennomgang på sinuskurven.



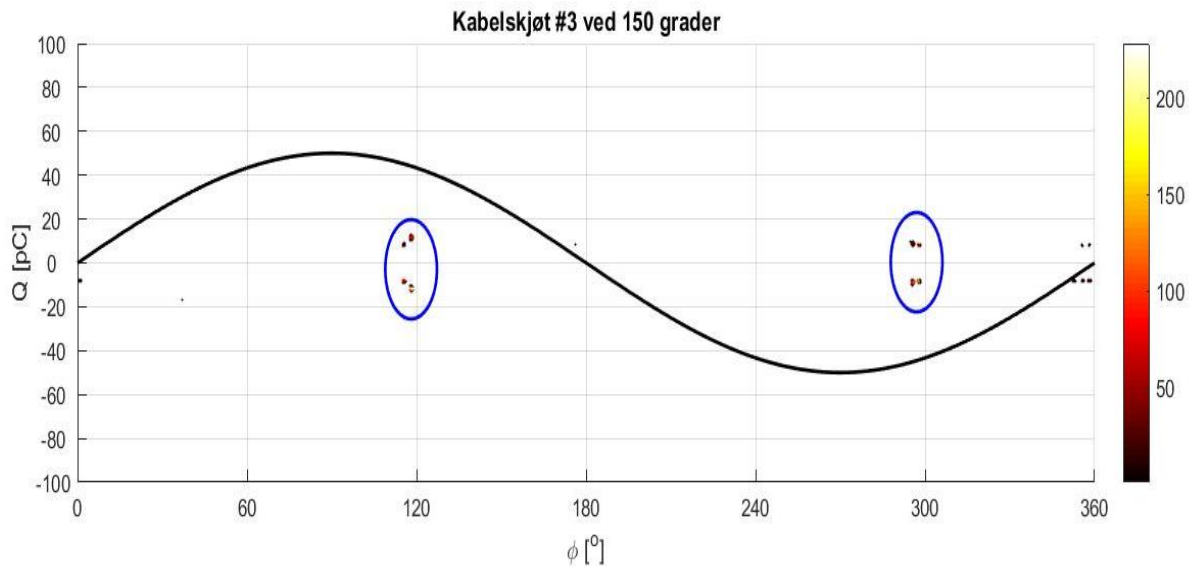
Figur 32: PD-plott fra forsøk 1 ved henholdsvis 130 grader og 30 kV. Registreres kun noe støy ved nullgjennomgang.

Utenom kobbernett så viste kabelskjøten ellers ingen andre fysiske tegn til aldring utenpå selve skjøten, og ble derfor satt tilbake i varmeskapet for videre aldring.

## Forsøk 2

Forsøk 2 ble gjennomført etter ca. to uker (336 t). Målingene registrerte ingen partielle utladninger, som vist i Figur 33. Sammenlignet med kabelskjøt #2 kunne man kjenne en liten forskjell på selve skjøten, ved at kabelskjøt #3 kjentes mer kompakt og hardere ut. Dette kan være på grunn av den konstante varmen som skjøt #3 har blitt utsatt for har gjort slik at alle lagene i skjøten har blitt krympet ekstra, i motsetning til skjøt #2 som har blitt termisk ekspandert og sammentrukket.

De blå sirklene i Figur 33 markerer støy som ble registrert under PD-målingen.

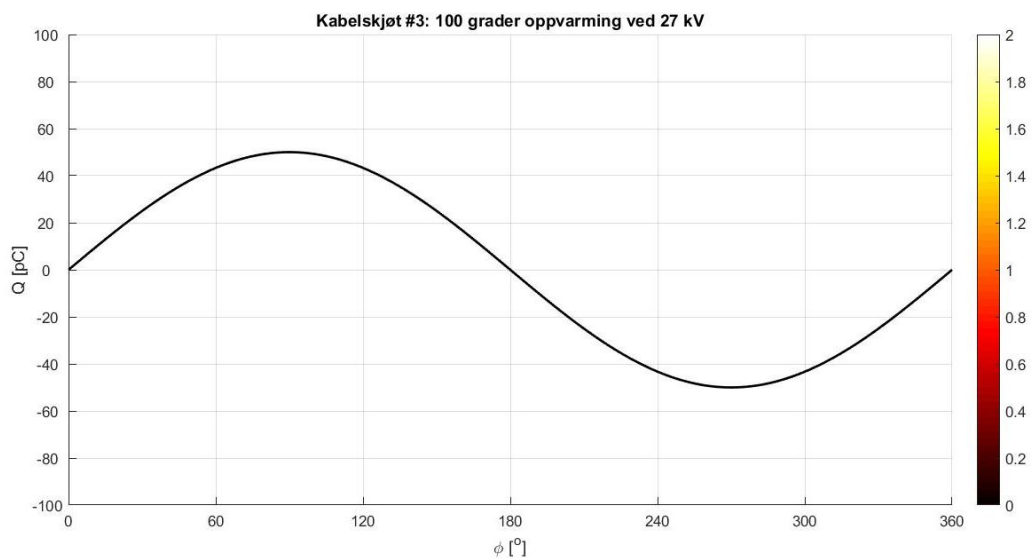


Figur 33: PD-plott fra forsøk 2 ved henholdsvis 150 grader og 30 kV. De blå sirkelene indikerer støy som ble registrert.

### Forsøk 3

Etter 408 t med aldri ble Forsøk 3 gjennomført. Forsøket ble gjennomført som normalt frem til 100 °C oppvarming ved 28 kV. Ved 28 kV ble spenningsvariaken koblet ut. Det ble forsøkt å påtrykke en spenning igjen, men da koblet variaken seg ut allerede ved 1 kV fordi den flytende strømmen i kretsen var alt høy. For å finne ut om dette skjedde på grunn av testobjektet eller en annen del av kretsen, ble testobjektet koblet fra. Spenningsvariaken ble så koblet inn igjen, med kun transformator og kondensator koblet til, og alt virket tilsynelatende som normalt. Det ble derfor konkludert med at testobjektet var problemet, og at det muligens oppstod et termisk gjennomslag.

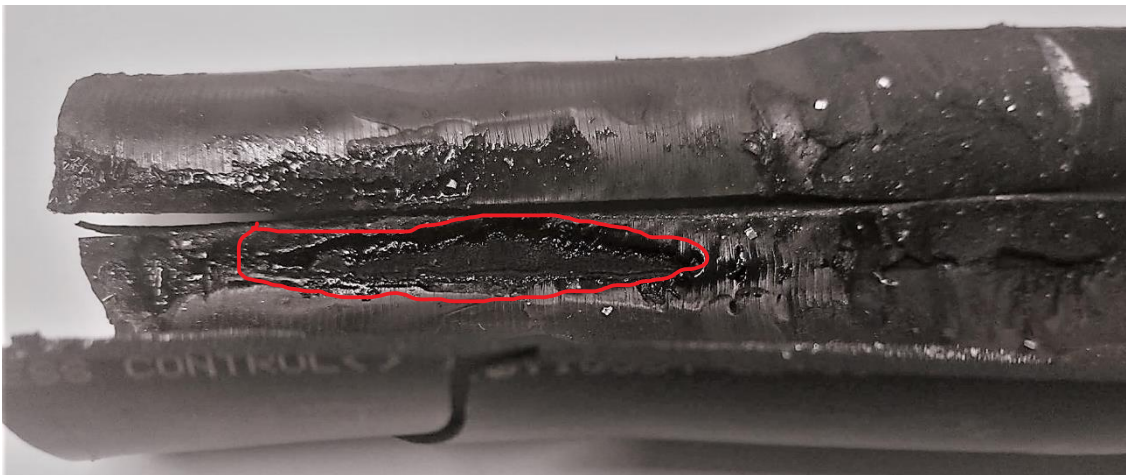
Figur 34 viser måling ved 100 °C med en påtrykt spenning på 27 kV. Det ble ikke registrert partielle utladninger ved noen av målingene.



Figur 34: PD-plott fra forsøk 3 ved henholdsvis 100 grader og 27 kV. Det ble ikke registrert støy eller PD.

Testobjektet ble koblet fra laboratoriekretsen, og det ble brukt en isolasjonsmåler (også kjent som Megger) for å måle isolasjonsresistiviteten i kabelskjøten. Normalt sett skal motstanden være i størrelsesordenen gigaohm ( $G\Omega$ ), mens kabelskjøten ble målt til å være  $40\text{ k}\Omega$ . Det vil si at skjøten er lavohmig, og det trolig har oppstått et gjennomslag. For å være sikker på at resistivitetsmålingen stemte, ble det gjort en ny måling da kabelskjøten hadde fått kjølt seg ned. Ved ny måling viste måleren at motstanden i skjøten var på  $120\text{ k}\Omega$ , som fortsatt regnes som lavohmig. For å ha en sammenligning ble kabelskjøtt #2 også testet, og den hadde en motstand på over  $50\text{ G}\Omega$ . Målingene ble gjort ved  $1\text{ kV}$ .

For å undersøke testobjektet for termisk gjennomslag måtte disseksjon til. Skjøten ble kappet opp på langs og de ulike lagene ble adskilt. Antakelsene om termisk gjennomslag stemte, og Figur 35 viser hvor i skjøten gjennomslaget oppstod.



Figur 35: Bildet viser det feltstyrende materialet i skjøten der det har oppstått gjennomslag.

Som bildet viser oppstod gjennomslaget i den feltstyrende slangen og man kan tydelig se at det har vært strømgjennomgang (markert med rødt i bildet). Et gjennomslag kan ha oppstått på grunn av overoppheting av isolasjonsmaterialet. Dette kan føre til at materialet forringes og at de isolerende egenskapene reduseres, som videre kan føre til havari. Når en belastning blir påtrykket en elektrisk krets med f.eks. en kabelskjøtt, som i denne masteroppgaven, vil temperaturen etter hvert stabiliseres på en viss temperatur. Dersom isolasjonsegenskapene blir redusert kan temperaturutviklingen fortsette helt til et gjennomslag oppstår og ikke stabiliseres, som trolig har skjedd i dette tilfellet.

Isolasjonsmaterialet viser tydelig tegn til misfarging, og er et resultat av antioksidantene som er tilsatt isolasjonsmaterialet reagerer med oksidasjonen som skjer ved høy temperatur (se Figur 36). Antioksidantene er tilsatt for at isolasjonsmaterialet ikke skal bli sprøtt, som nevnt i kapittel 2.3.1. I tillegg til isolasjonen var det tydelig misfarging av den gule mastiken, som lå utenpå hylsen.



Figur 36: Bildet viser PEX-isolasjonen etter disseksjon. Det røde markerte området kan muligens ha fått et gjennomslag som vises ved misfargingen og sprøhet i materialet. På grunn av tidsmangel ble dette ikke undersøkt nærmere, og det kan derfor ikke konkluderes med at det har oppstått gjennomslag her.

Det røde markerte området på bildet i Figur 36 ble først antatt å bare være et merke fra den feltstyrende slangen. Ved en nærmere observasjon og i samråd med forskere på SINTEF ble det spekulert i om det kunne ha oppstått et gjennomslag her også. Dette fordi materialet var noe sprøtt og på grunn av misfargingen. Ved å studere isolasjonsbiten i et mikroskop kunne det blitt konkludert i om det har oppstått gjennomslag eller ikke, men da gjennomslaget oppstod på et så sent tidspunkt ble ikke dette gjennomført grunnet tidsmangel.

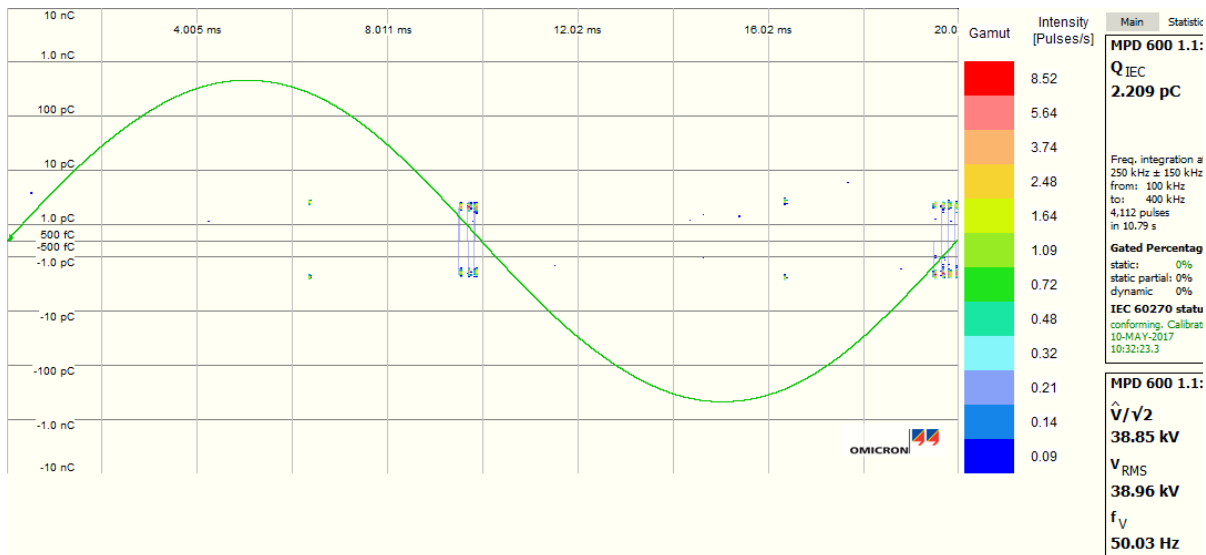
Selv om det ikke ble registrert noen partielle utladninger under noen av forsøkene på testobjekt #3, så viste skjøten likevel fysiske tegn til aldring ved oksidasjon av materiale som misfarget kobbernett, skjøten var blitt mer kompakt enn den var før forsøkene startet og sammenlignet med de andre skjøtene, og det oppstod et termisk gjennomslag.

Flere bilder fra disseksjonen av kabelskjøtt #3 er lagt ved i Vedlegg D.1.

### 4.3.2 | Fuktige omgivelser

Testobjekt #4 ble fuktet og aldret i et varmeskap med konstant temperatur på 150 °C. Før forsøkene ble satt i gang ble skjøten målt PD-fri opp til 40 kV. Kabelskjøten ble testet inne på EFI-laboratoriet til SINTEF rett etter montering av kabel. Denne målingen ble gjort uten et OMICRON-system, kun ved bruk av oscilloskop, og ble målt PD-fri til 40 kV. Figur 37 viser måling ved 39 kV fra den tildelte cellen inne i celledelt-hallen på NTNU, der alle forsøkene ble gjennomført. Det er ikke vedlagt bilde fra 40 kV da spenningsvariaken koblet seg ut ved passering av 40 kV, og siden forsøkene ikke skal påtrykkes en høyere spenning enn 30 kV anses dette som godt nok.



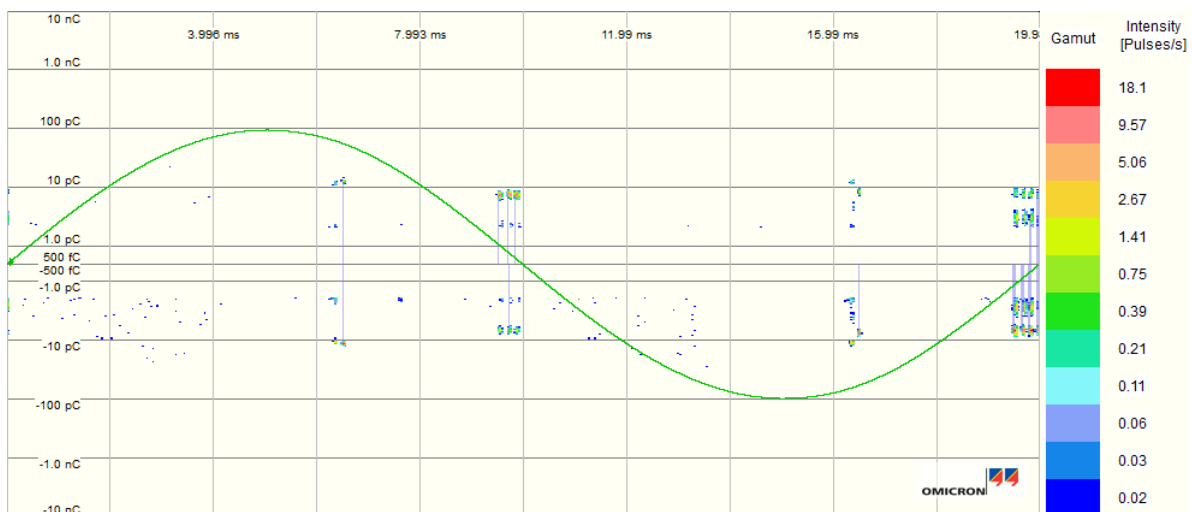


Figur 37: PD-plott av test av kabelskjøt #4. Kabelskjøten ble målt PD-fri til 40 kV.

Det registreres kun litt støy ved nullgjennomgang og ingen partielle utladninger.

### Forsøk 1

Forsøk 1 ble gjennomført etter 168 t og målingene resulterte i ingen partielle utladninger. Figur 38 viser en av målingene fra 150 °C ved lederen, med en påtrykt spenning på 30 kV. Det registreres kun støy som det også har vært tilstede ved måling av de andre testobjektene i de første forsøkene.



Figur 38: PD-plott fra forsøk 1 ved henholdsvis 150 grader og 30 kV. Det ble ikke målt PD, det ble kun registreres noe støy.

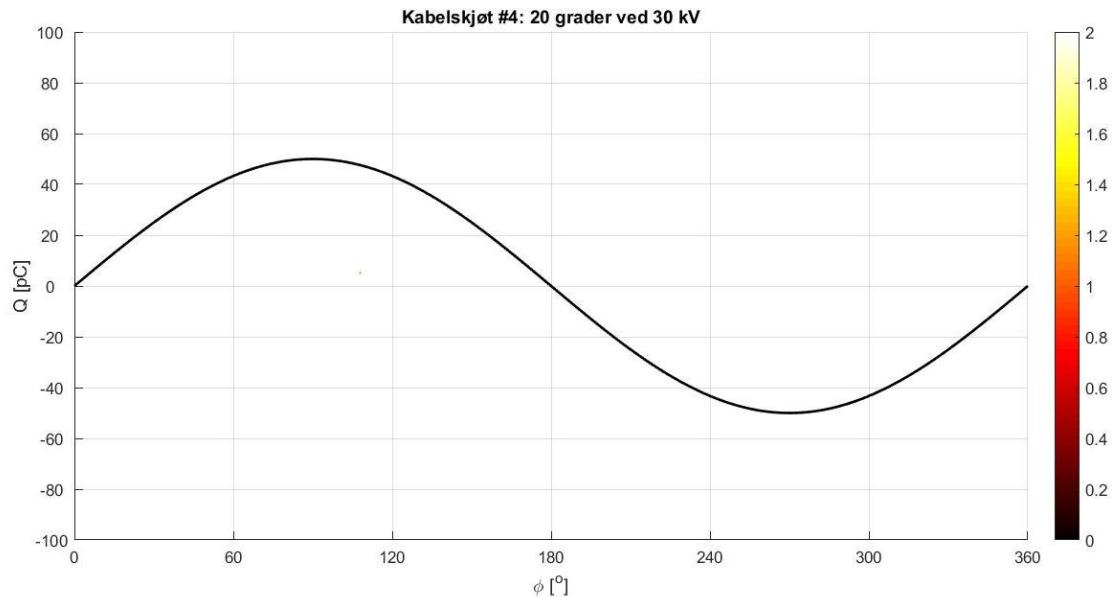
Resultatene fra Forsøk 1 viser at kabelskjøten tåler påkjenningen den blir utsatt for i fuktige omgivelser i en uke.



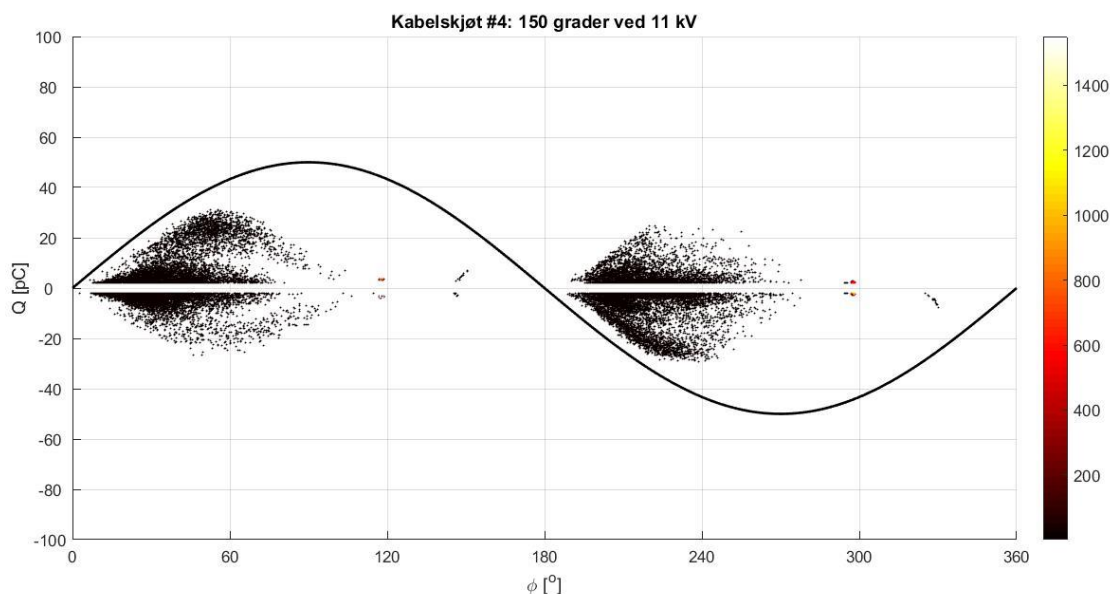
## Forsøk 2

Forsøk 2 ble gjennomført etter 240 t, som vil si at testobjektet har vært under påkjenning av høy temperatur i ti dager. Under dette forsøket oppstod det partielle utladninger ved alle målinger utenom ved romtemperatur. Dette viser at målingene er påvirket av temperatur.

Både Figur 39 og 40 har en støygrense på 2 pC. Under alle målingene i Forsøk 2 var mesteparten av støypobleme borte. Nærliggende forsøk stod ikke på under dette forsøket, og kan derfor bekrefte at tidligere støypoblematikk ikke kom fra laboratoriekretsen det har blitt gjennomført PD-målinger på. Figur 39 viser måling ved romtemperatur der det ikke oppstod noen partielle utladninger opp til 30 kV, mens Figur 40 viser måling ved 150 °C med påtrykt spenning på 11 kV. Utladningene skjer ved stigende og fallende flanke, og kan derfor karakteriseres som hulromsutladninger.



Figur 39: PD-plott av forsøk 2 ved henholdsvis 20 grader og 30 kV. Det ble verken registrert PD eller støy.



Figur 40: PD-plott fra forsøk 2 ved henholdsvis 150 grader og 11 kV. Det ble detektert PD, og støygrensen er satt til 2 pC.

Denne kabelskjøten var i utgangspunktet PD-fri opp til 40 kV, og etter å ha vært aldret i 10 dager har tennspenningen sunket til 11 kV. Det vil si at den høye temperaturen har hatt en stor innvirkning på aldringsprosessen, og sammenlignet med de andre testobjektene har den høye temperaturen hatt en mye større påkjenning for den fuktige kabelen.

Tennspenningen hadde ikke store variasjoner under oppvarming, men økte gradvis under nedkjøling, som vist i Tabell 13.

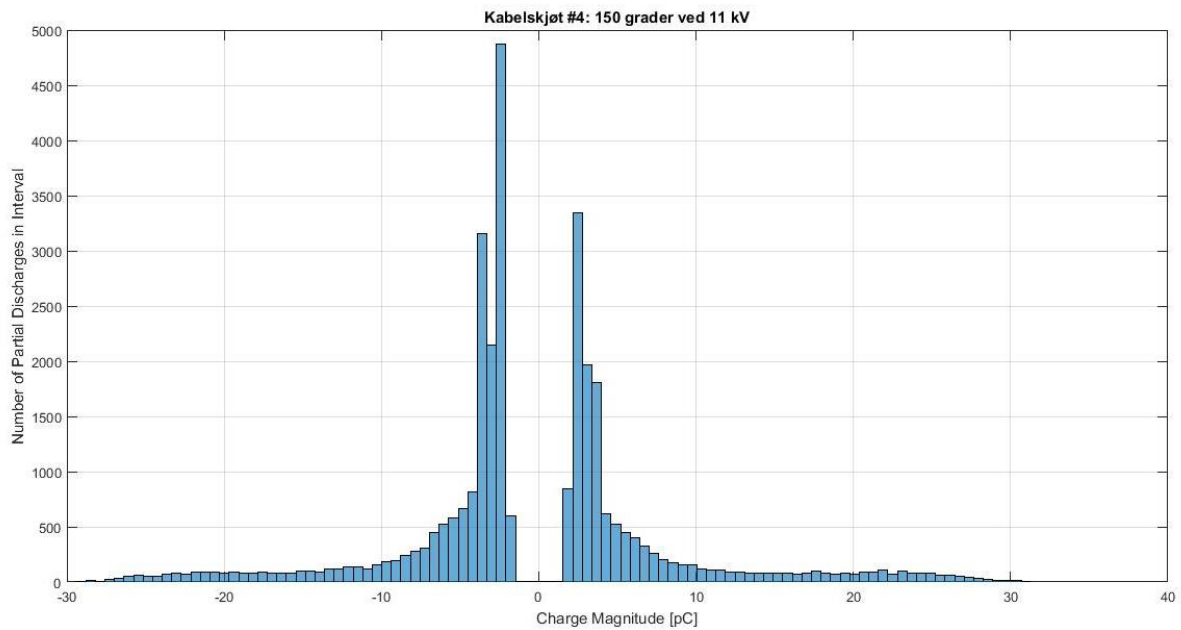
Tabell 13: Tabellen viser en oversikt over tennspenningene ved de ulike målingene i forsøk 2.

TEMPERATUR V. OPPVARMING OG NEDKJØLING [°C]	TENNSPENNING [KV]
20 ROM	Ingen PD
70 OPP	8
100 OPP	8
130 OPP	11 (litt PD fra 9 kV)
150	11 (litt PD fra 10 kV)
130 NED	9
100 NED	14
70 NED	19

Målingene viser at tennspenningen til testobjektet blir påvirket av en påtrykt belastning, og så snart belastningen skrur av, øker tennspenningen igjen. Selv om tennspenningen ved 130 °C under nedkjøling fortsatt er lav, kan dette være fordi temperaturen i lederen synker fra 150 °C til 130 °C på ca. ti minutter når belastningen skrur av, og det vil derfor være et lite tidsrom mellom PD-målingene.

I alle målingene der PD ble detektert ble det observert at de positive og negative ladningene var ca. like store, og at antallet var tilnærmet den samme. Dette er illustrert i Figur 41. Figuren viser

en liten overvekt av negative utladninger. Det observeres også at de fleste utladningene opptrer med en lav amplitude.

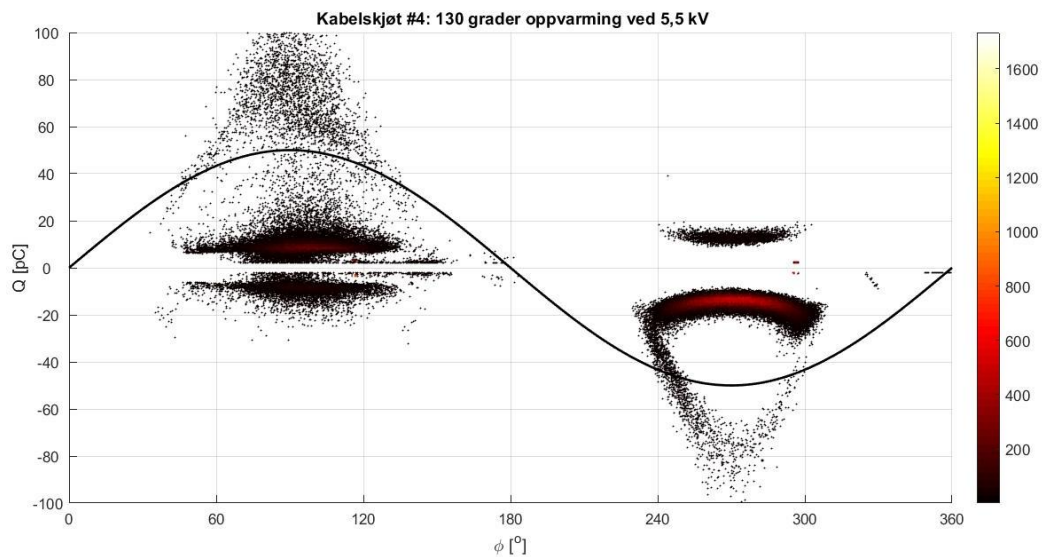


Figur 41: Separasjon av positive og negative utladninger ved henholdsvis 150 grader og 11 kV. Det kan observeres en liten overvekt av negative utladninger.

### Forsøk 3

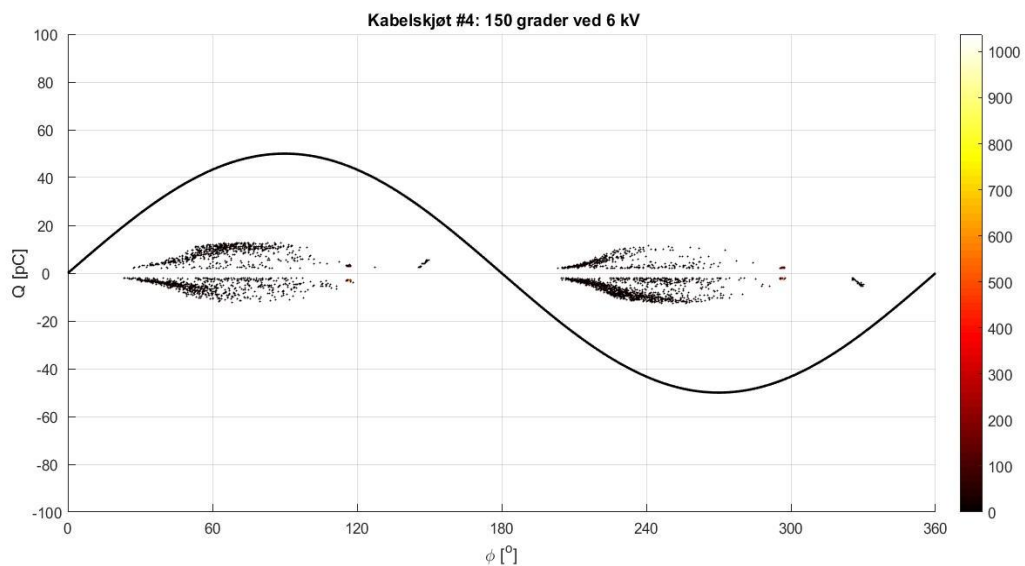
Aldringsprosessen for testobjekt #4 ble avsluttet etter 360 t. Målingene detekterte PD ved alle temperaturene.

Under målingene ved 100 °C ble utladningene noe forandret fra hva som tidligere har blitt registrert, og et eksempel er vist i Figur 42. Noen av målingene viste antydning til at det ble registrert både hulromsutladninger og noe som lignet på koronautladninger. Det ble derfor gjort flere undersøkelser for å se om utladningene som antydte korona kunne bli fjernet. Det ble først gjort målinger ved å koble fra testobjektet, og da virket alt som normalt. Det ble også gjort endringer som å jorde ekstra godt ved testobjektet, i tilfelle kobbernettene ikke hadde oksidert for mye og ikke fungerte som optimalt. Målingene ble likevel lignende Figur 42.



Figur 42: PD-plott fra forsøk 3 ved henholdsvis 130 grader og 5,5 kV. Det oppstod utladninger som både lignet korona og hulrom.

Det ble besluttet å ta bort karet fra testobjektet, for å se om det kanskje kunne være det som detekterte slike utladninger. Tiltaket fungerte og PD oppstod som tidligere, og kunne karakteriseres som hulromsutladninger. Det var noen vannrester igjen i karet, som det var vanskelig å få bort, så det kan antas at det var noe vann som ikke var jordet godt nok og har skapt de koronalignende utladningene. Figur 43 viser utladning fra 150 °C ved 6 kV etter at karet ble fjernet fra skjøten.



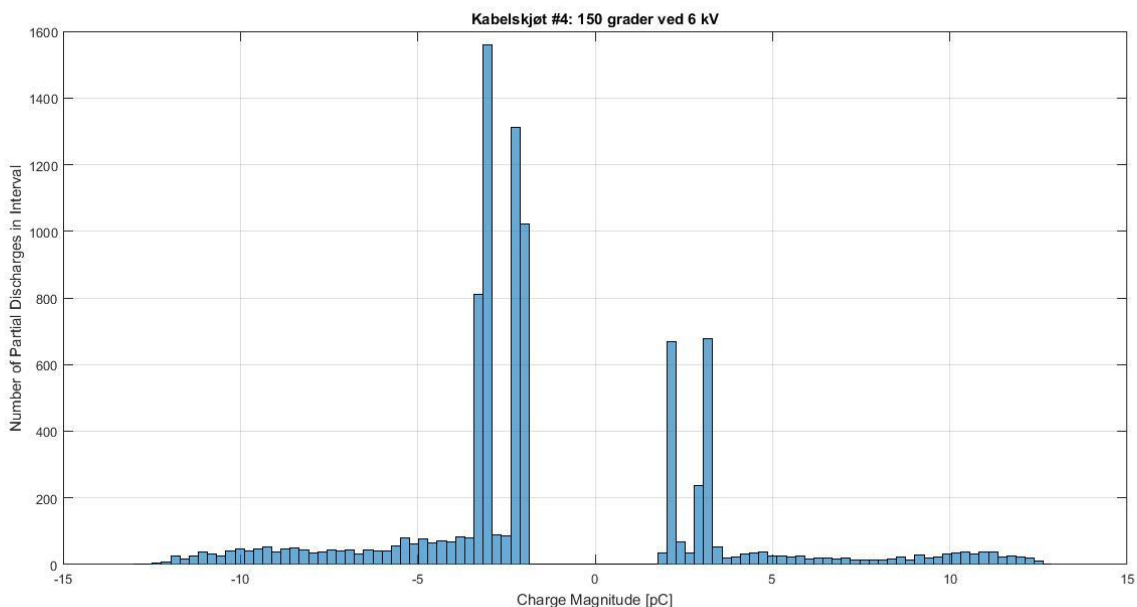
Figur 43: PD-plott fra forsøk 3 ved henholdsvis 150 grader og 6 kV. Det detekteres PD, og dette kan karakteriseres som hulromsutladninger.

Etter 360 timer aldring viser resultatene at tennspenningen har sunket siden forrige forsøk. Tennspenningen viser ingen tegn til å minke under oppvarming og øke under nedkjøling, men målingene viser en tydelig tendens til at tennspenningen minker i takt med aldring, da snittet på tennspenningen i Forsøk 3 ligger på 6 kV.

Tabell 14: Tabellen gir en oversikt over tennspenningene ved de ulike målingene i forsøk 3. Det kan observeres at tennspenningen er tilnærmet lik ved alle målingene.

TEMPERATUR V. OPPVARMING OG NEDKJØLING [°C]	TENNSPENNING [KV]
20 ROM	4
70 OPP	7
100 OPP	6
130 OPP	7
150	6
130 NED	7
100 NED	5
70 NED	6

Separasjon av de positive og negative utladningene som oppstår ved 150 °C viser en overvekt av negative utladninger, og er vist i Figur 44. Som figuren viser oppstår de fleste utladningene ved lave amplituder.



Figur 44: Separasjon av positive og negative utladninger ved henholdsvis 150 grader og 6 kV. Det kan observeres at det er flest negative utladninger.

På testobjekt #4 kunne det observeres at aldringsprosessen hadde satt siden spor. Mye lim fra skjøten hadde blitt presset ut, og lagt seg rund i karet (se Figur 45). Det kunne også observeres deformasjon av skjøten, som sannsynligvis har oppstått ved at skjøten har ligget inntil karet. Visuelt var det også tydelig tegn til uttørking av skjøten (se Figur 46). Uttørkingen har oppstått på grunn av tidsrom der skjøten ikke har vann i karet, som over natten når alt vannet

har fordampet. Selve karet var også blitt veldig sprøtt etter aldringsprosessen og kunne lett knekkes sammen dersom man klemte litt på det.



Figur 45: Bildet viser karet etter end forsøk. Det observeres lim som har blitt presset ut av skjøten.



Figur 46: Bildet viser skjøten som har tørket ut. Dette har skjedd pga. fordamping av vann over natten.

## 4.4 Oppsummering

Etter 528 timer aldring viste testobjekt #2 ingen tegn til partielle utladninger. Det kan tenkes at tiden mellom lastsyklusene og måling av de andre testobjektene kan ha saket aldringsprosessen noe, men dersom aldringsprosessen hadde foregått over en litt lengre tidsperiode kan det tenkes at PD-målingene ville gitt utslag.

Resultatene fra fuktet og tørr skjøt, testobjekt #3 og #4, viser at å aldre skjøter under konstant temperatur på 150 °C er en effektiv måte å akselerere aldringsprosessen til materialene på. Testobjekt #4 detekterte PD, og tendenser viser at over tid vil tennspenningen minke. Det observeres også at utladningene som oppstår, opptrer hyppigst ved lave amplituder.

Måling av isolasjonsresistivitet og disseksjon av testobjekt #3 viser at skjøten ikke har blitt aldret på grunn av høy kontaktmotstand som kunne ført til varmgang av skjøtehylsen. Disseksjon viser at termisk gjennomslag oppstod langs det feltstyrende materialet. Det har muligens oppstått gjennomslag i PEX-isolasjonen også, men dette kan det ikke konkluderes med da det ikke ble tid til å undersøke materialet i mikroskop grunnet tidsmangel.

# 5 Konklusjon

Det har blitt utført PD-målinger på tre PEX-kabelskjøter som har blitt aldret under ulike betingelser.

Følgende konklusjoner kan trekkes:

- Effekten av å utsette det ene testobjektet for en temperatursykling i 528 timer (tilsvarende 22 temperatursyklus) viser ingen tydelige tegn til aldring av testobjektet. Det konkluderes med at forholdet mellom temperatur og tidsperioden for forsøkene ble gjennomført på ikke var tilstrekkelig for å kunne detektere PD, som følge av aldring.
- Resultatene viser derimot at aldring av skjøter under konstant påkjenning av høy temperatur (150 °C) er en effektiv måte for å akselerere aldringsprosessen til materialene. Dette vises ved at det oppstod termisk gjennomslag i ett av testobjektene, mens det i et annet testobjekt ble detektert partielle utladninger.
- Testobjekt #3 og #4 ble aldret i et varmeskap ved en temperatur på 150 °C, der det ene testobjektet var fuktet og det andre tørt. Ved ideell aldring, der skjøt #4 ville hatt vann i karet døgnet rundt, ville aldringsprosessen til skjøt #4 vært tregere enn for skjøt #3. Dette fordi vannet ville ha isolert skjøten til en temperatur på 100 °C.
- Ved disseksjon av det ene testobjektet ble det observert spor etter termisk gjennomslag langs det feltstyrende materialet. Materialene i dette testobjektet viser også visuelt tegn til aldring ved henholdsvis misfarget mastik, isolasjon og kobbernett, samt noen områder der det feltstyrende materialet er sprøtt.
- Tendenser viser at spenningsnivå vil minke med økt aldring.
- PD-målinger viser at utladningene opptrer hyppigst ved lave amplituder.





## 6 Videre arbeid

Etter gjennomført masterarbeid er det mange undersøkelser som kan være spennende og interessante å se nærmere på.

Forslag til videre arbeid:

- Det ble ikke detektert noen partielle utladninger på testobjekt #2, og det vil derfor være av interesse å fortsette å temperatursykle denne kabelskjøten for å se hvor lang tid som trengs før PD vil opptre. Før kabelskjøten aldres videre kan det være en idé å finne en måte slik at belastningen vil kobles av og på automatisk og ikke manuelt, for å spare tid og for at det skal være mer kontinuitet i aldringsprosessen.
- Testobjekt #4, som ble aldring i fuktige omgivelser, detekterte PD etter ti dager. Siden testobjektet ikke havarerte i løpet av aldringsprosessen kan det være interessant å gjøre videre PD-målinger. Under aldringsprosessen har det trolig trengt vann inn i skjøten, og det kan derfor være interessant å se om tennspenningen vil øke igjen etter flere målinger når vannet har trengt ut. Når vannet har trengt ut kan det også være interessant å fukte kabelen igjen og foreta flere målinger.
- Det kan være interessant å kjøre de samme PD-målingene som i denne masteroppgaven, bare med varierende frekvens. Dette for å undersøke frekvensavhengigheten til PD-målingene.
- Det kan være interessant å undersøke kabelskjøtene ved hjelp av dielektrisk spektroskopi, for å studere materialeegenskapene til skjøtene bedre.
- Det kan være interessant å gjennomføre de samme PD-målingene som i denne masteroppgaven for den fuktige skjøten, bare ved å temperatursykle skjøten i stedet for å aldre skjøten ved konstant temperatur. Dette for å gjøre målingene mer reelle.
- Å gjennomføre den samme aldringsprosessen med påtrykt spenning vil gjøre aldringsprosessen mer reell. Dersom dette gjøres kan resultatene sammenlignes med målingene gjort uten påtrykt spenning under aldringen, og se om det påvirker målingene.

# 7 Referanser

1. Niayesh, K., *Lecture in Condition Assessment of High Voltage Components*. 2016, NTNU: Trondheim.
2. Onninen. *Skjøter plast 12/24 kV*. 2017; Available from: <https://onnshop.onninen.com/no/EFO/Kabel/RTK-S1P-12-24-B-L-95-185-35/p/GCS923>.
3. Faremo, H. and et.al, "*Service Experience for XLPE Cables Installed in Norway - from Graphite Painted Insulation Screens to Axially and Radially Water Tight Cable Constructions*", *14th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED), Birmingham*. 1997: p. 3.2.1-3.2.5.
4. de Vries, F., *Experiences with PD measurements on MV cables in wind farms in the Netherlands*, in *F05D meeting IEEE/ICC*. 2009, Scottsdale AZ.
5. Ildstad, E., *TET 4195 High Voltage Equipment, Cable Technology*. 2009, Trondheim: NTNU.
6. Ildstad, E., *ELK30 - Condition Assessment of high voltage components*. 2016, Trondheim: NTNU.
7. Hvidsten, S., *Condition Assessment of High Voltage Components*, in *Compendium ELK-30* 2016, NTNU: Trondheim.
8. Connectivity, T., *Brochure: Heat Shrink Raychem Technology* 2016, TE Connectivity.
9. Mårtensson, E., *Modelling Electrical Properties of Composite Materials*, in *Institutt for Elkraftteknikk*. 2003, Kungl Tekniska Högskole: Stockholm, Sverige.
10. Halvorson, H.L., "*Condition Assessment of Wind Farm Medium Voltage Cable Joints*", *Masteroppgave*. juni 2012, NTNU: Trondheim.
11. Runde, M., *Current Interruption in Power Grids*, in *TET4195 High Voltage Equipment*. 2015, NTNU: Trondheim. p. 7.1-7.18.
12. Nexans. *XLPE insulated cables*. 2017 [14.02.2017]; Available from: [http://www.nexans.co.uk/eservice/UK-en\\_GB/navigate\\_326083/Submarine\\_Cables\\_36\\_525\\_kV\\_technology.html](http://www.nexans.co.uk/eservice/UK-en_GB/navigate_326083/Submarine_Cables_36_525_kV_technology.html).
13. Densley, J., *Ageing mechanisms and diagnostics for power cables - an overview*. 2001. **17**: p. 14-22.
14. Mauseth, F.H., H.L. Hvidsten, S., *Diagnostic Testing of Thermally Aged Medium Voltage XLPE Cable Joints*. Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2012.
15. (CEA), C.E.A., *Long Term Reliability of Polymer Cables at High Temperatures*. July 1997.
16. Al, B.e., *Thermal and Mechanical Properties of EPR and XLPE Cable Compounds*. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2006. **22**(3): p. 19-24.

17. Lundgaard, L., *Partielle utladninger: Begreper, måleteknikk og mulige anvendelser for tilstandskontroll*. 1996, SINTEF Energy AS, SINTEF Energy Research Trondheim.
18. NEK, *IEC 60270 3-1*, in *High-voltage test techniques: Partial discharge measurements*. 2015, Standard Online AS: NTNU Universitetsbibliotek.
19. Kreuger, F.H., *Industrial High Voltage*. Vol. II. 1992, Delft University Press.
20. Ildstad, E., *TET4160 Insulating Materials for High Voltage Applications*. 2015, Trondheim: NTNU.
21. Smisethjell, H., "*Partielle utladninger i kryssbundet polyetylen med forurensninger*", *Masteroppgave*. juni 2016, NTNU: Trondheim.
22. Khan, A.A., *General Guidelines for Online Partial Discharge Testing of Power Cables*. 2015.
23. Society, I.P.E., *IEEE Guide for Partial Discharge Testing of Shielded Power Cable Systems in a Field Environment*. 2007: USA, New York.
24. OMICRON, *Measuring Systems: Getting Started* O. electronics, Editor. 2013, OMICRON electronics GmbH.



# 8 Vedlegg

**Vedlegg A** – Utstysrliste

**Vedlegg B** – MATLAB-skript

**Vedlegg C** – Montering av skjøtehylsene

**Vedlegg D** – Resultater

**D.1** – Disseksjon av testobjekt #3

**D.2** – PD-målinger fra testobjekt #4

**Vedlegg E** – Del 2 fra poster presentasjon

## Vedlegg A – Utstyrliste

<b>LABNR.</b>	<b>TYPE</b>	<b>MERKEVERDIER</b>	<b>FABRIKAT</b>
<b>B01-0013</b>	Trafo Høyssp. 1Fas	220 V/100 kV	Ferranti
<b>B01-0293</b>	Trafo Styrepult 1Fas	0/260 V-8 A-Maks-1Fas	Egen
<b>B01-0791</b>	Trafo Variac 1Fas	230 V– 0-300V 3 A 900 A	Noratel
<b>B03-0493</b>	Generator Funksjon	2ch, 50MHz, 1Gs/s	Tektronix
<b>G05-0150-02</b>	Datalogger Modul	300 V, 1 A, 50 W	Agilent
<b>G05-0172</b>	Datalogger	300 V, 100 MΩ, 10 MHz	Agilent
<b>H02-0172</b>	Part. Utladninger		Power Diagnostix
<b>I04-0255</b>	Strømmåler Tang.	100 mA – 1000 A RMS	Fluke
<b>I04-0485</b>	Strømmåler Tang. AC/DC	True RMS, 0 – 600 A, AC/DC	Fluke
<b>I06-0486</b>	Spenningsprobe Diff.	1 kV, 25 MHz, Peak 1,3 kV	Tektronix
<b>P07-1827</b>	PC		Acer

## Vedlegg B – MATLAB-skript

Skriptet som har blitt brukt i oppgaven har blitt laget av Ingeborg Bjurholt, sommerstudent ved SINTEF Energi.

MATLAB-skript som har blitt brukt i oppgaven:

```
%DETTE SKRIPTET KALLER PÅ ALLE PLOTT-FUNKSJONENE JEG BRUKER I ANALYSEN MIN
clear all
%IMPORT ALL PD DATA
importAllData; % gets PH, phase_deg, Q, t_q, t_v, V

%DEFINERER TITTEL PÅ FORSØKET
ttl = input('Skriv tittelen på forsøket: ');

%LAGER PRPDA-PLOTT
prpda_plot(PH, Q, ttl);

%LAGER WEIBULL-PLOTT; BÅDE 2 OG 5-PARAMETERS
statistisk_analyse_5_param_wbl(Q,ttl);

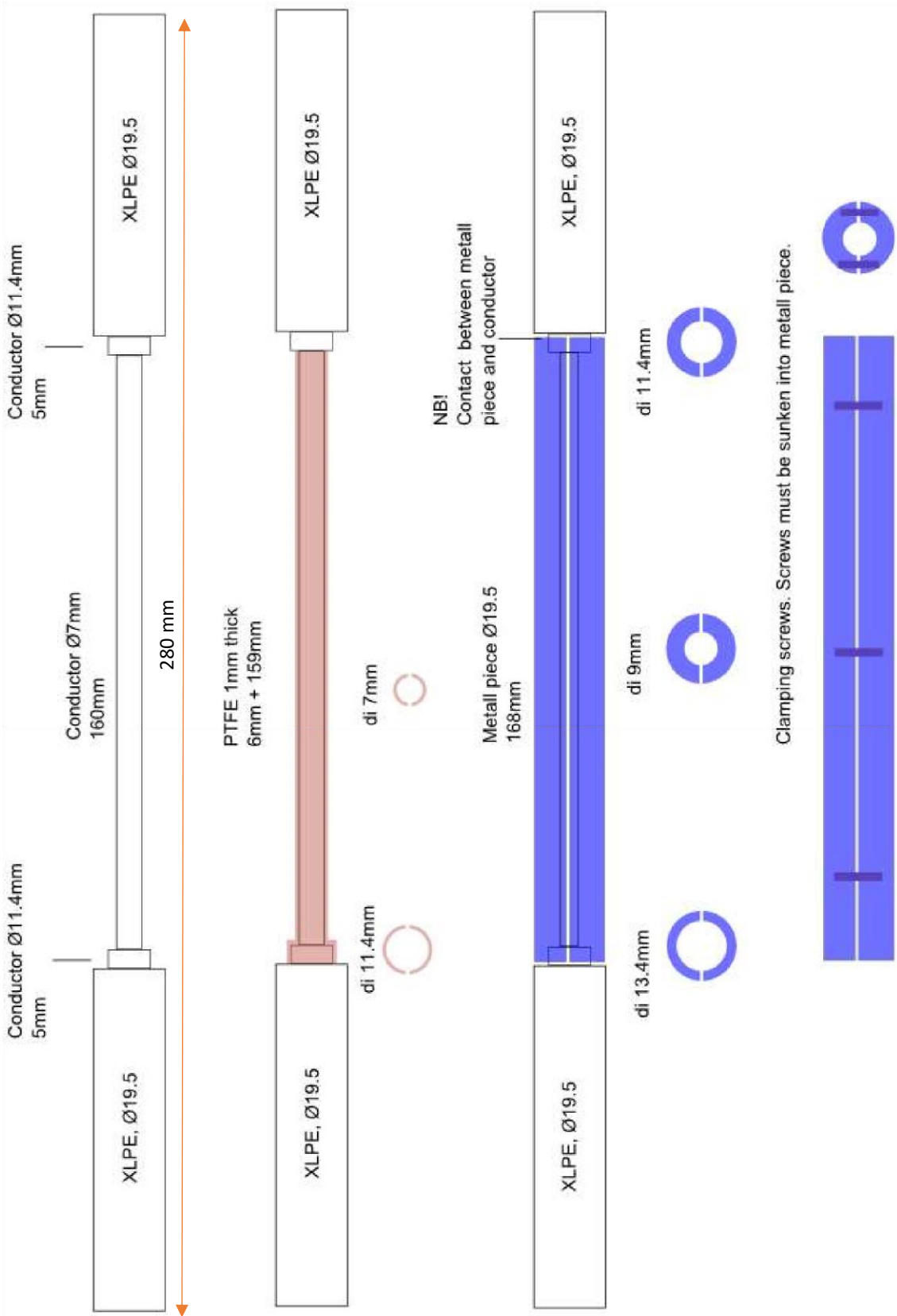
%LAGER PSA- TIME PLOTT
figure(3)
psa_time_plot( t_q , ttl);

%LAGER PSA- CHARGE MAGNITUDE
figure(4)
psa_charge_plot(Q, ttl);

%LAGER HISTOGRAM- MERK: DEFINER ANTALL KOLONNER SELV
number_of_ints = 100;
figure(5)
charge_histogram( Q, number_of_ints, ttl );
```


# Vedlegg C – Montering og dimensjonering av hylse

Montering og dimensjonering av skjøtehylsen er den samme som fra en tidligere masteroppgave [10].



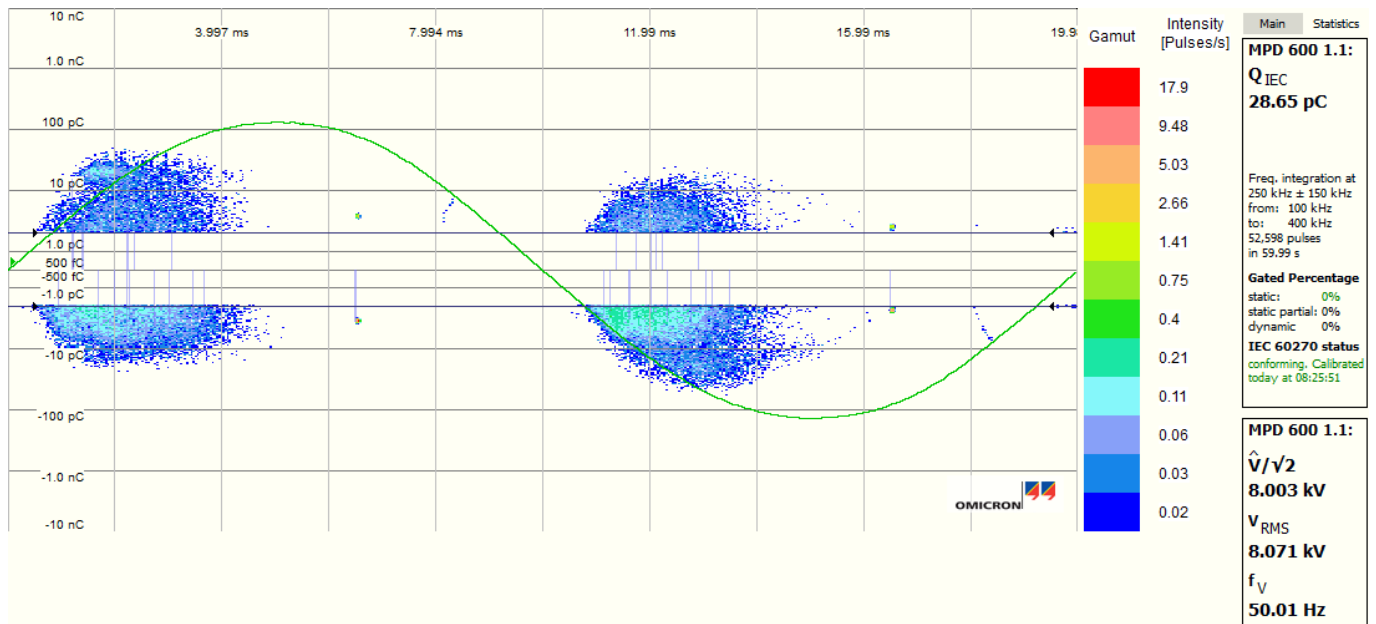


## Vedlegg D.1 – Disseksjon av testobjekt #3

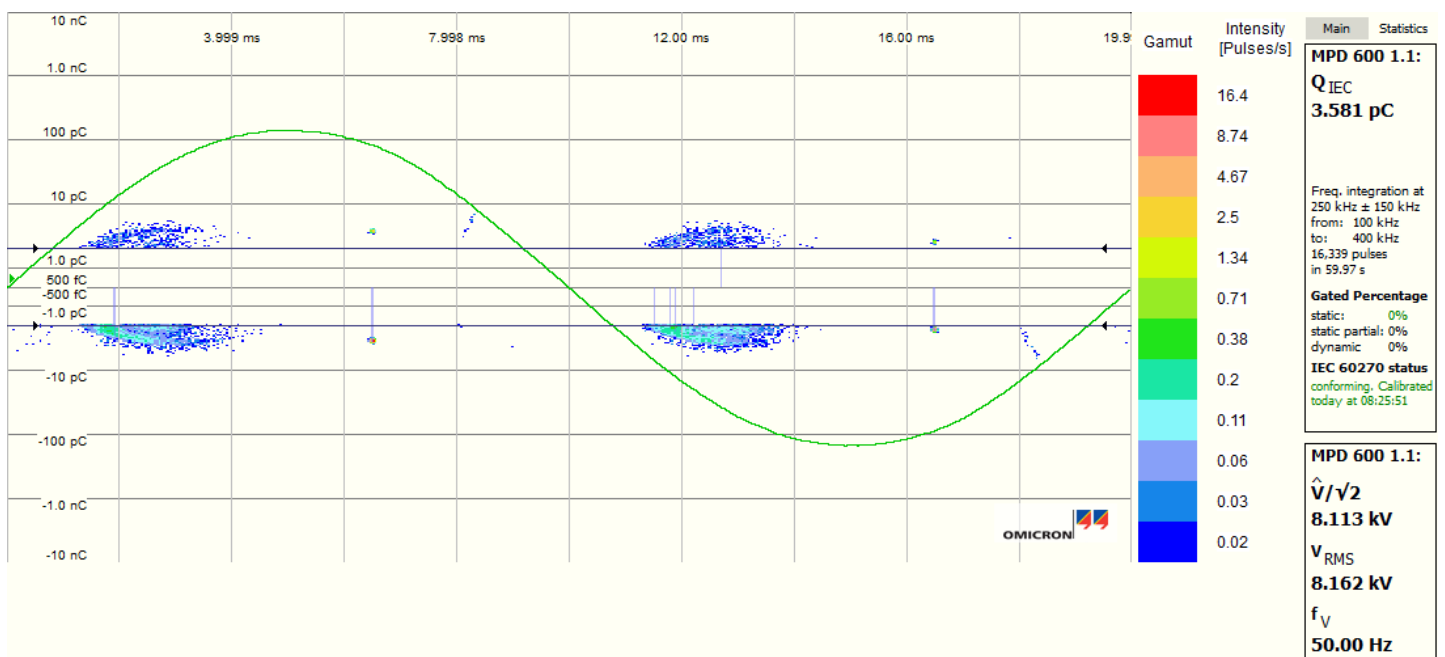
	<p>Det ble først forsøkt å ta av mellomkappen med kniv. Det viste seg at dette ble en veldig tungvint måte for å adskille de ulike delene, og derfor ble kablet kappet på langs.</p>
	<p>Kabelskjøten ble kappet i to før alle de ulike delene ble adskilt.</p>
	<p>Her har de ulike lagene blitt adskilt. Man kan tydelig se en misfarging både i isolasjonsslangen, på den feltstyrende slangen og PEX-isolasjonen. PEX-isolasjonen blir raskt misfarget pga. antioksidantene som tilsettes i isolasjonen for å unngå sprøhet.</p>
	<p>Bildet viser termisk gjennomslag langs den feltstyrende duken. Bildet er i sort/hvitt for å bedre vise hvor gjennomslaget har oppstått.</p>
	<p>I starten så det ut til at det markerte området på PEX-en hadde oppstått pga at den feltstyrende slangen satt godt fast. Men en nærmere kikk, kunne tyde på at det kanskje har vært et gjennomslag som vises ved hjelp av misfargingen og observasjon om at isolasjonen så sprø ut. Dette kan ikke sies med sikkerhet, da det ikke ble tid til å undersøke PEX-en i mikroskop.</p>

## Vedlegg D.2 – PD-målinger av testobjekt #4

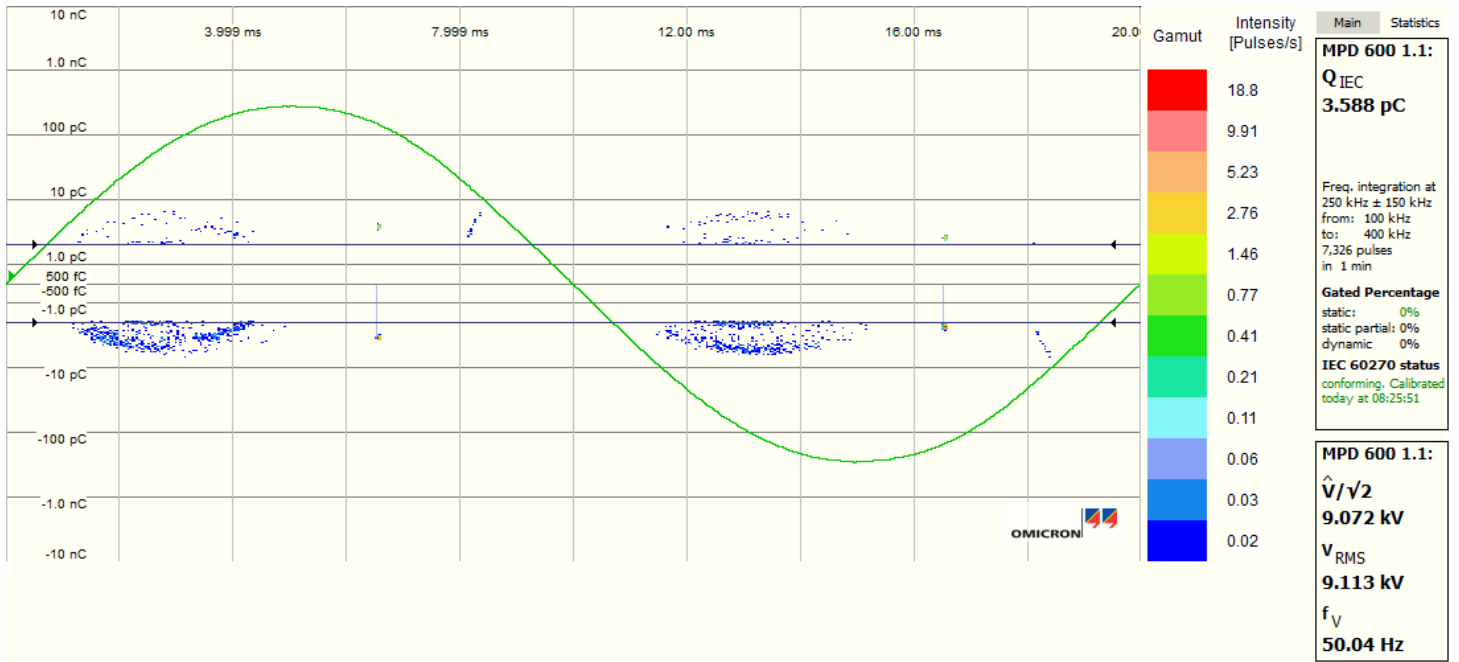
PD-plott fra forsøk 2



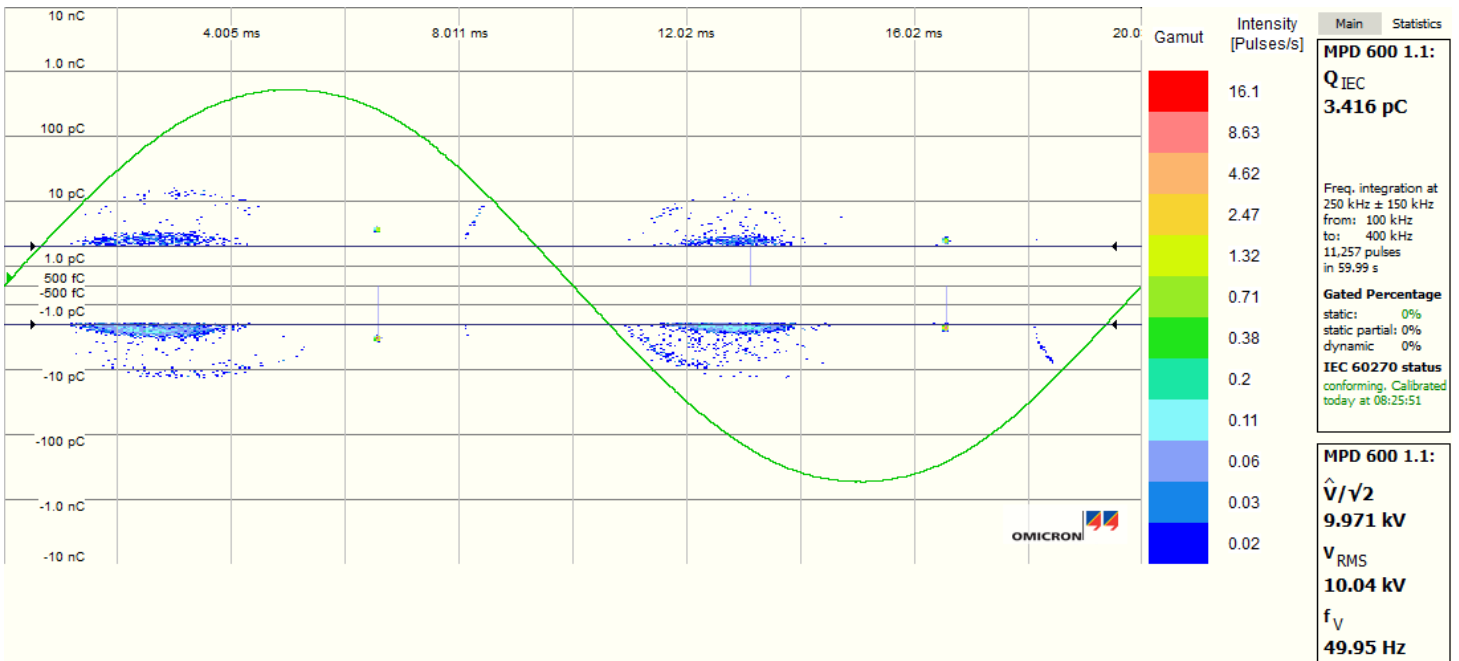
Tennspenning ved 70 °C oppvarming



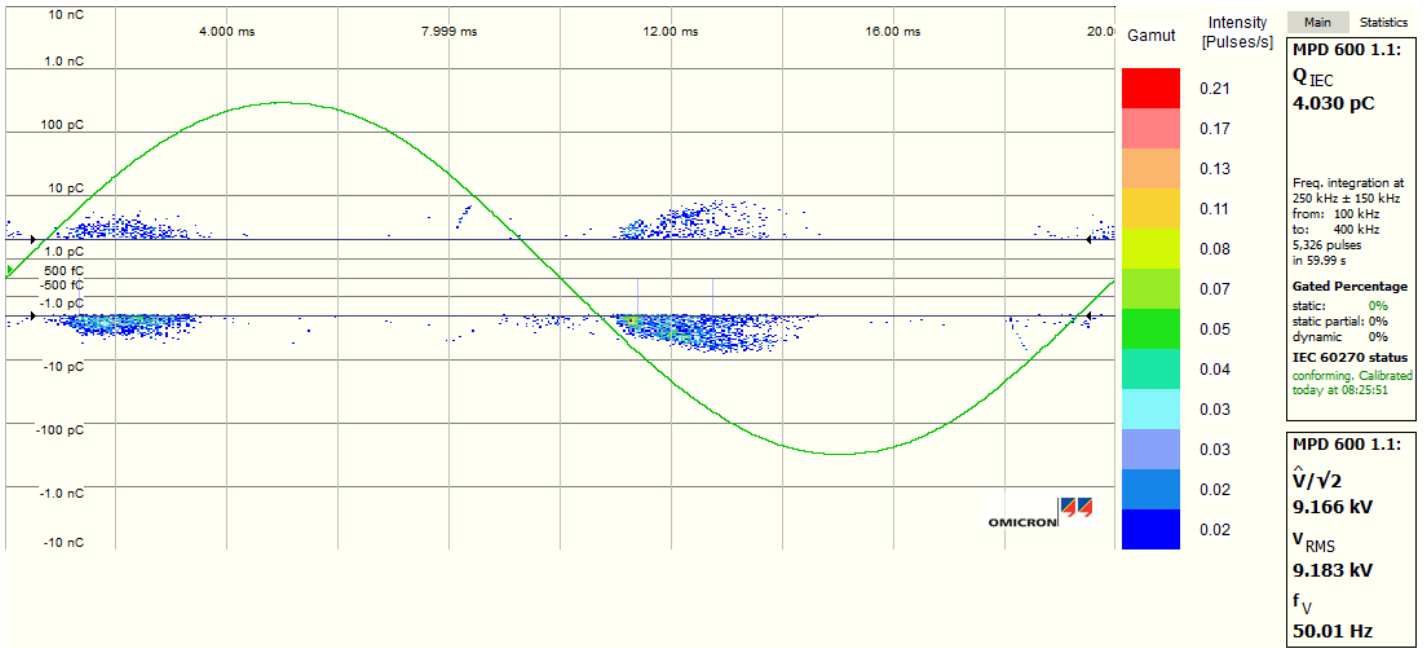
Tennspenning ved 100 °C oppvarming



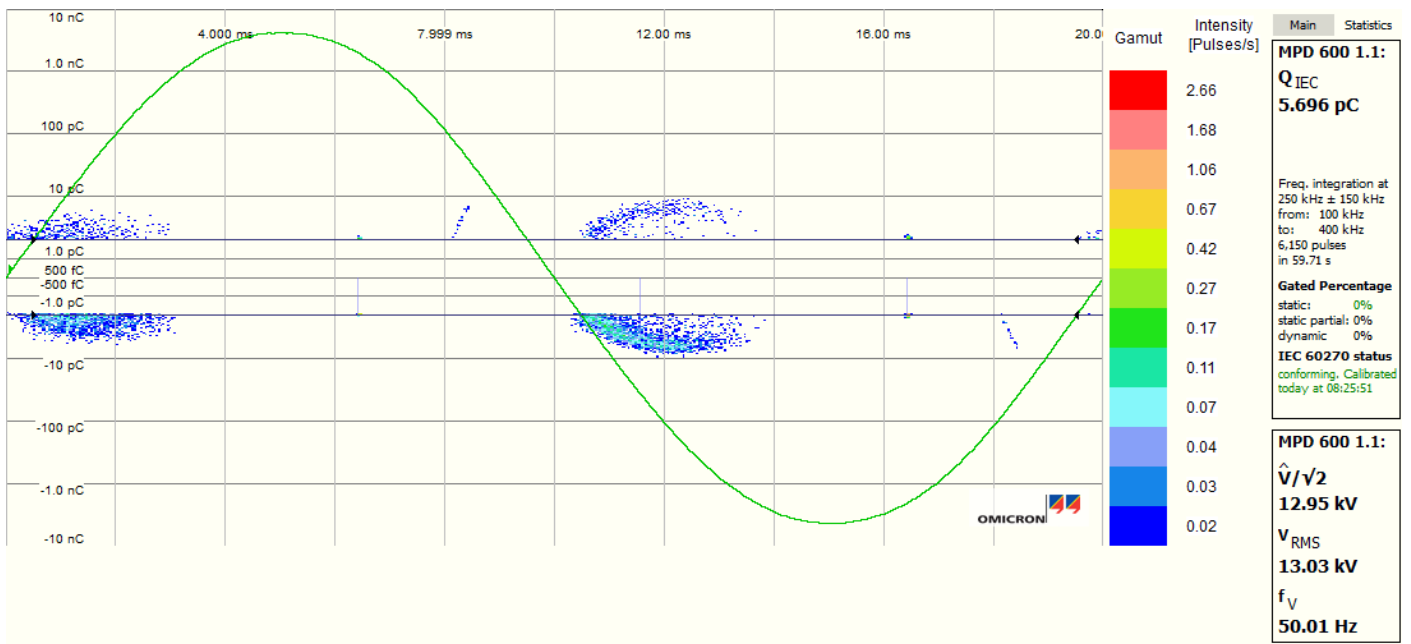
Tennspenning ved 130 °C oppvarming



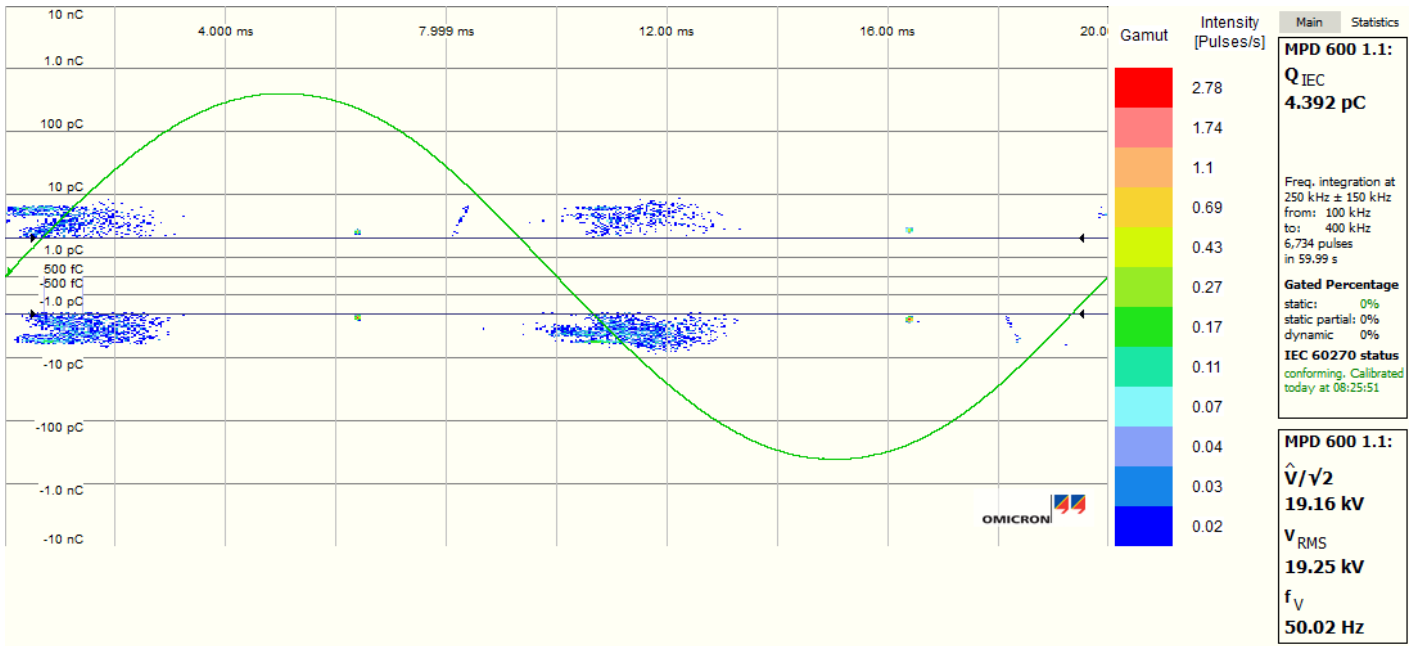
Tennspenning ved 150 °C



Tennspenning ved 130 °C nedkjøling



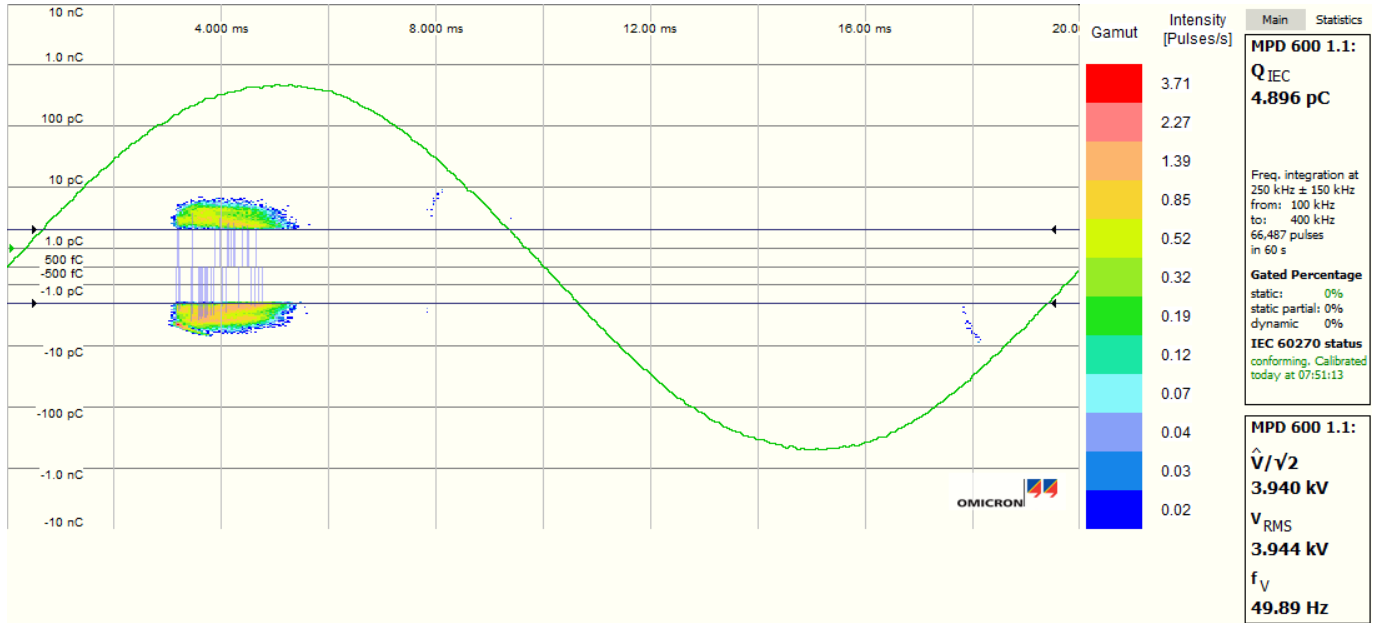
Tennspenning ved 100 °C nedkjøling



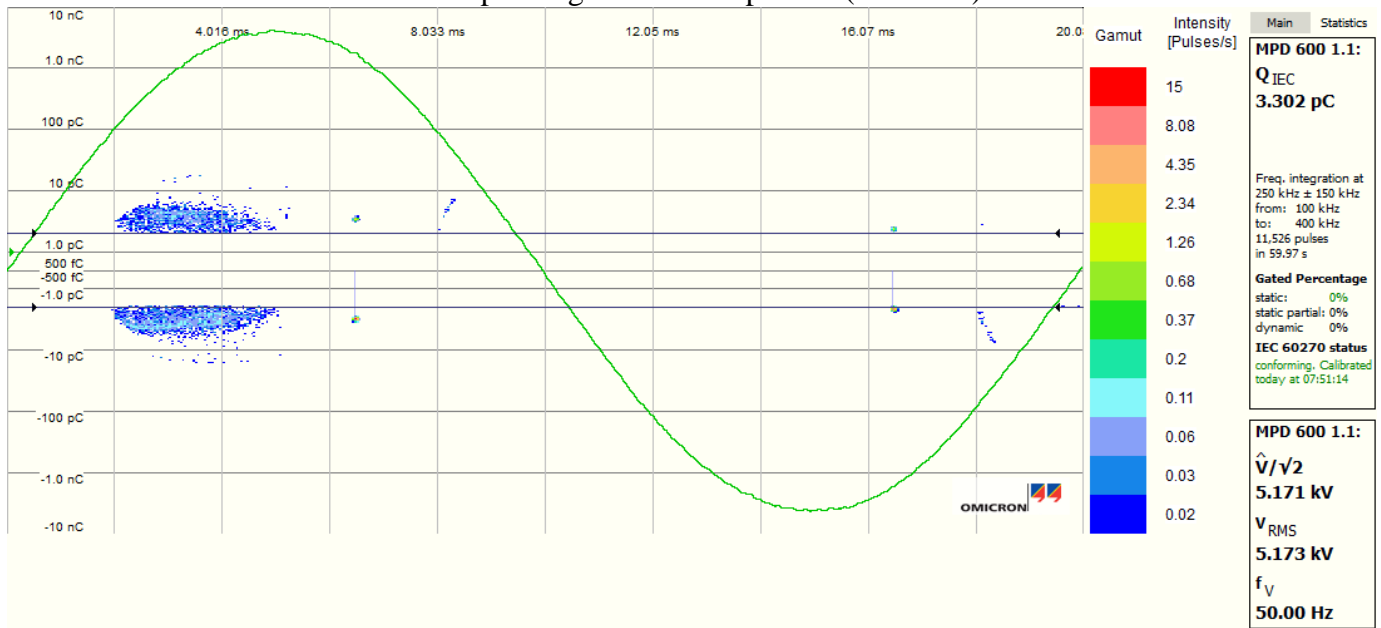
Tennspenning ved 70 °C nedkjøling

# Vedlegg D.2 – PD-målinger av testobjekt #4

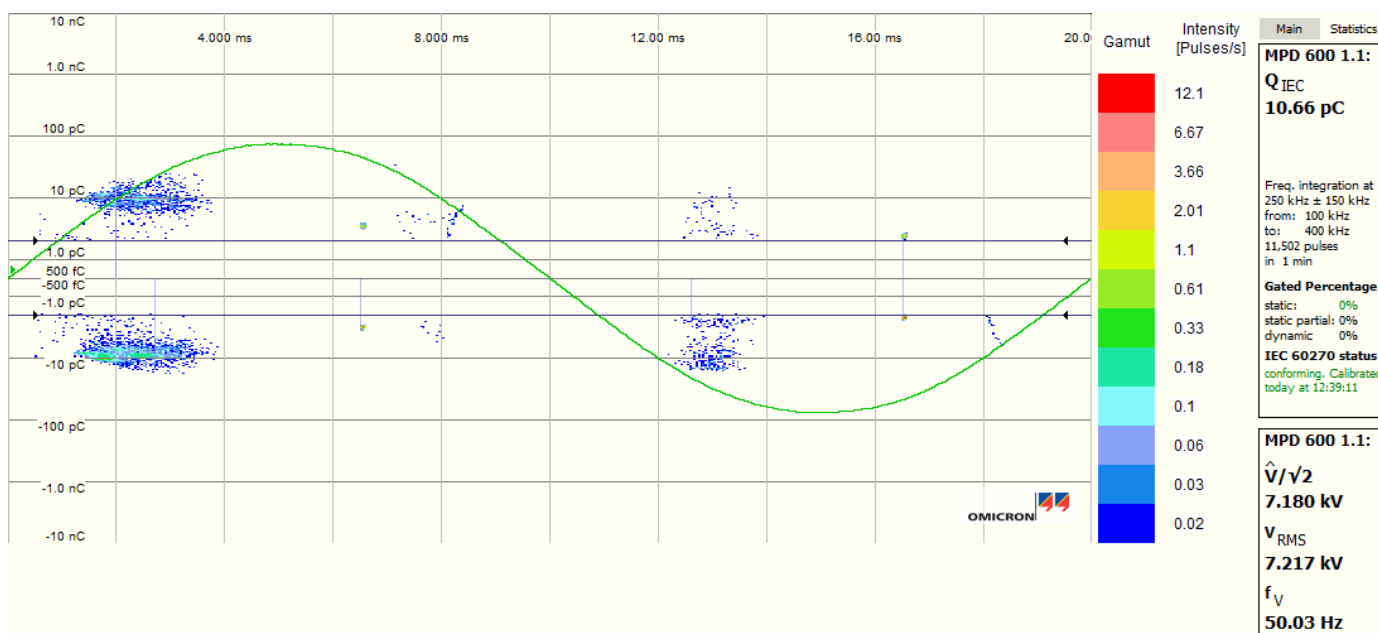
PD-plott fra forsøk 3



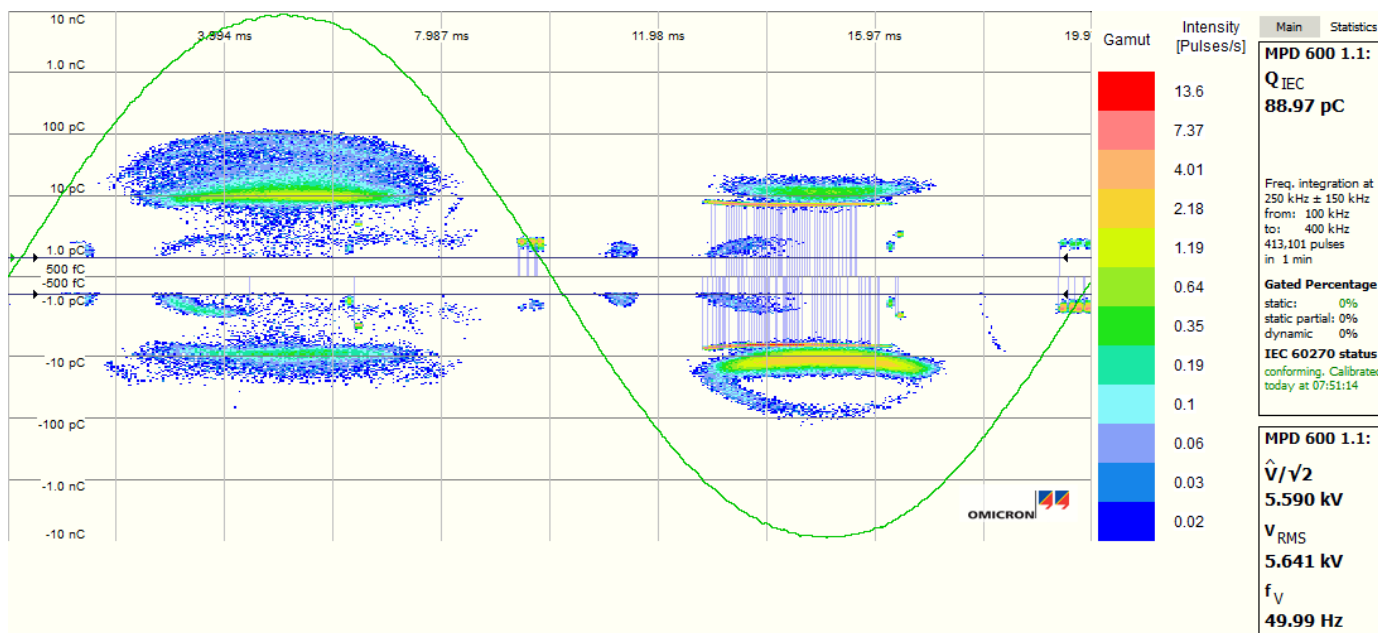
Tennspenning ved romtemperatur (ca. 20 °C)



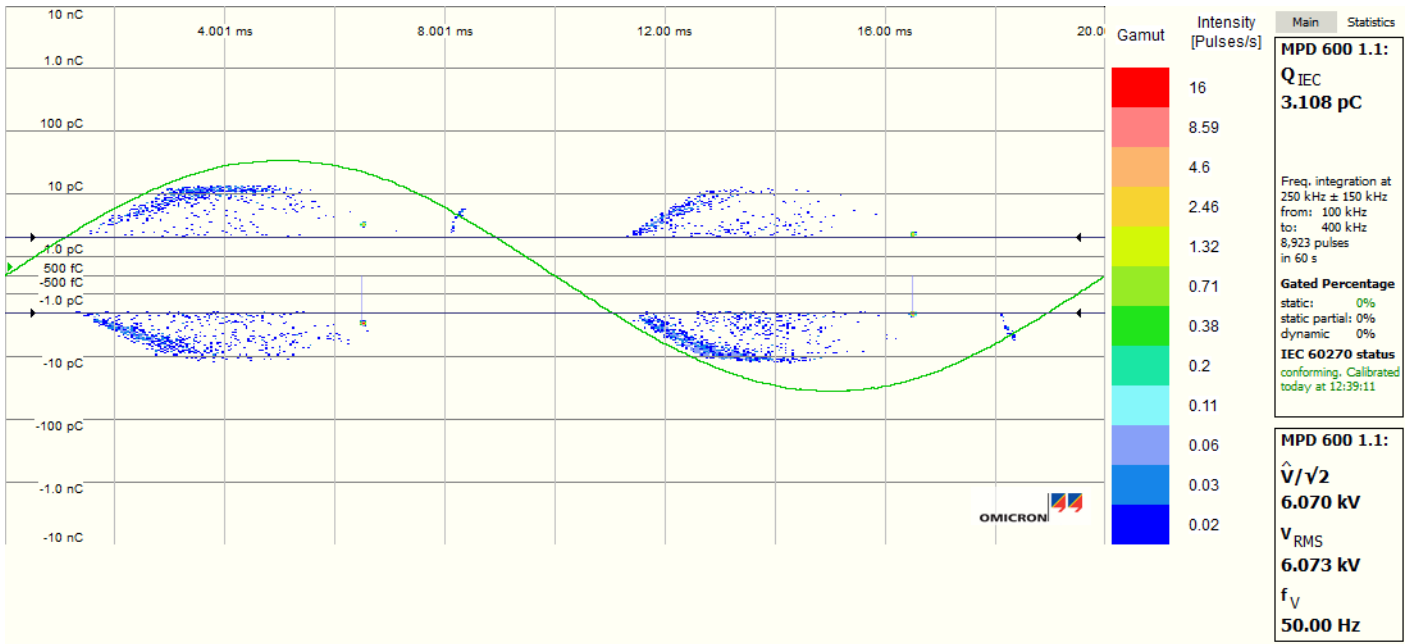
Tennspenning ved 70 °C oppvarming



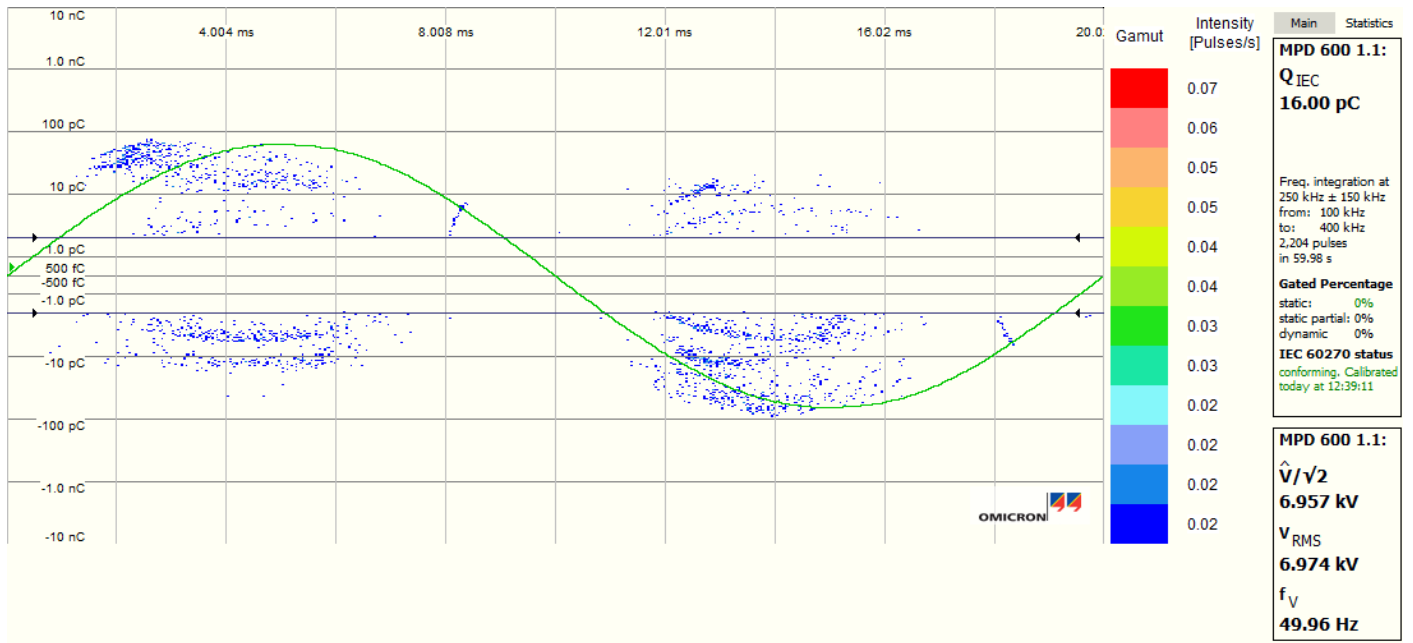
Tennspenning ved ny 70 °C måling, oppvarming. Etter at karet var blitt fjernet.



Eksempel fra hvordan en måling var med karet på, ved 100 °C oppvarming. PD-plottet viser tegn til både hulromsutladninger og korona.

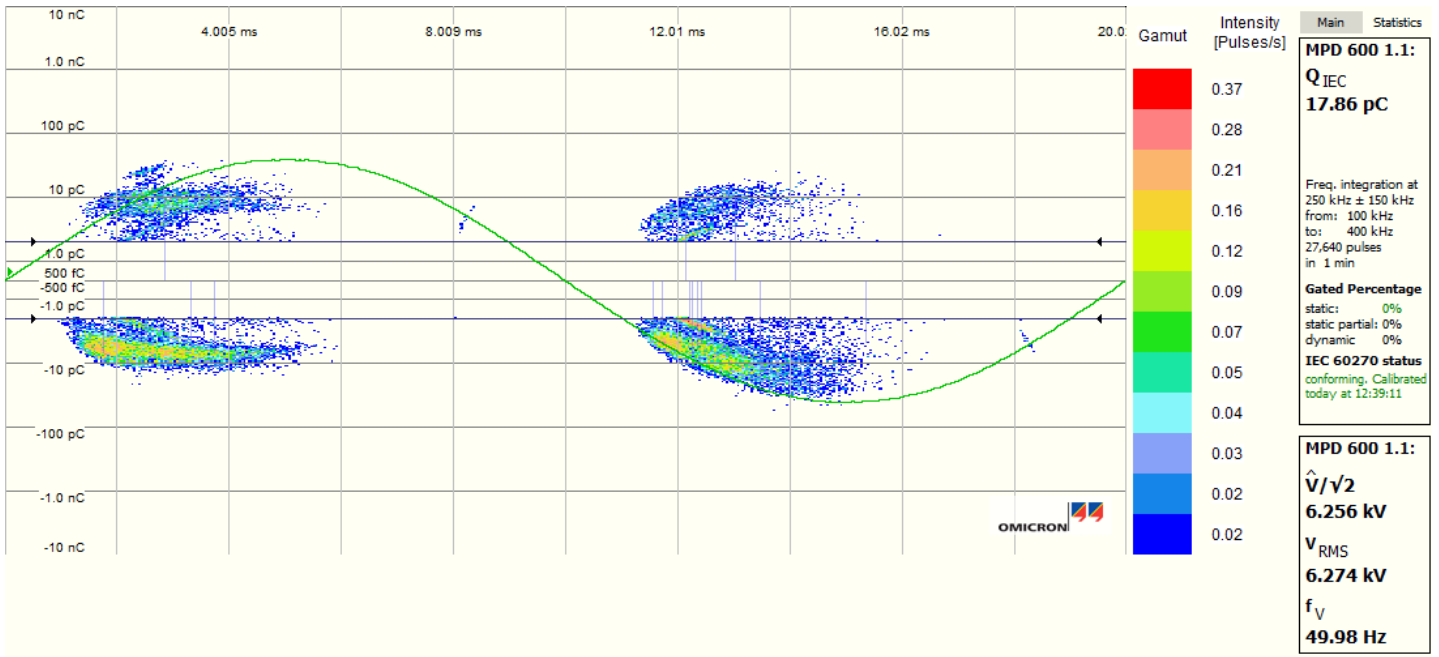


Tennspenning ved 150 °C

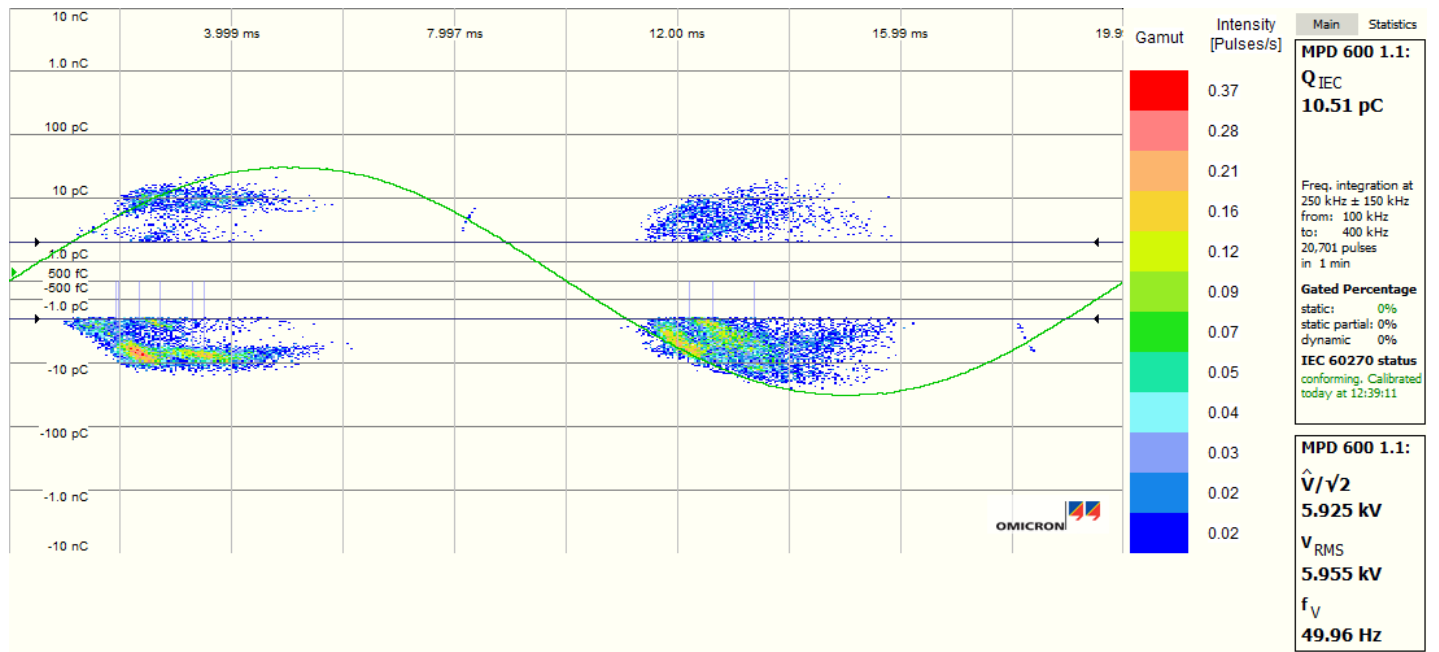


Tennspenning ved 130 °C nedkjøling





Tennspenning ved 100 °C nedkjøling



Tennspenning ved 70 °C nedkjøling

## Vedlegg E – Poster presentasjon. Hvordan lage en kabelskjøt

You know how to make a cable joint? No? Well, check this out!

Karoline Skjelsvik

Frank Mauseth, NTNU  
Sverre Hvidsten, SINTEF

1: Ytre halvleder og isolasjon skrelles vekk. 2: 5mm på hver side skal være igjen av lederen. 3: Ytre kordellag sages av.



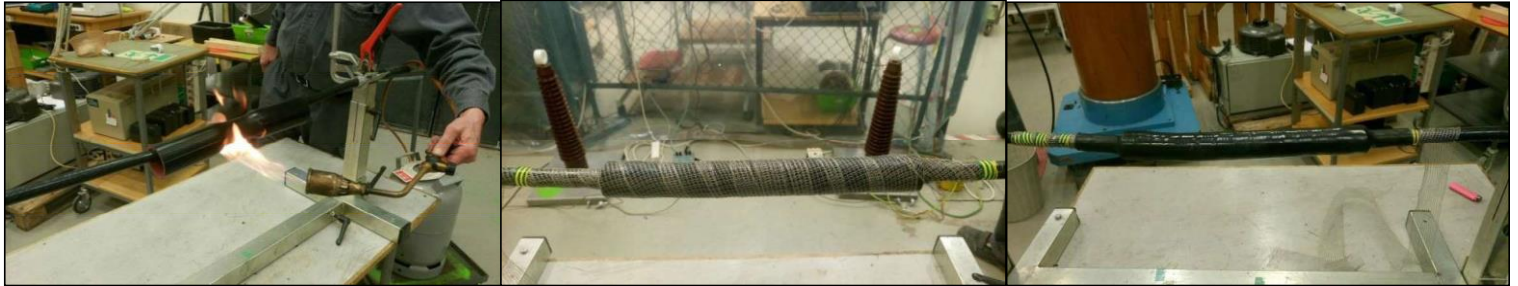
4: Nå har kabelen fått et redusert ledertverrsnitt. 5: Et teflonlag legges på før metallhylsen skrues på. Teflonet har kontakt med leder i ene enden for å unngå strømgjennomgang. 6: Metallhylse skrudd på. Hodene på skruene blir filt vekk slik at ingen spisse kanter er tilstede.



7: Gul mastikk legges på for å tette alle hulrom. 8: Felforderslange krympes på, som sørger for jevn feltbelastning over hele skjøten. 9: Skjermet isolasjonsslange krympes på, som opprettholder isolasjonsnivået.



10: Alle slangene krympes på med propan gassbrenner. 11: Fortinnet kobbernett vikles på. 12: Til slutt ble en mellomkappe krympet på, som sørger for at vann ikke skal trenge inn i skjøten, og for å bevare de mekaniske egenskapene.



Ønsker å rette en stor takk til Horst H. Førster som har tatt seg tid til å vise og lære meg hvordan man monterer varmkrymp kabelskjøter.

---

Poster presentation of Master theses



June, 9<sup>th</sup> 2017

Faculty of Information Technology, Mathematics and Electrical Engineering

Department of Electric Power Engineering