

Tilstandskontroll av mellomspennings kabelskjøt

Undersøkelse av frekvensavhengighet til
partielle utladninger

Håkon Tollefsen

Master i energi og miljø

Innlevert: juni 2014

Hovedveileder: Frank Mauseth, ELKRAFT

Medveileder: Sverre Hvidsten, SINTEF

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Institutt for elkraftteknikk

Project description

A significant part of the Norwegian medium voltage cable distribution net is older than the expected lifetime of 30 years. Cable joints have a shorter expected lifetime than the cable. In case of heat-shrink joints installed in the 80's, many service failures have occurred due to over-heating of the metallic connector. In general, the condition of the insulation of the joints can be assessed by partial discharge measurements. However, the impact of the frequency of the test voltage on the assessment is not clear. Therefore, this project will focus on relevant service aged joints and determine the impact of the test voltage frequency on the assessment.

The project work will be mainly experimental. The joints will be characterised by using different non-destructive methods, such as partial discharge and dielectric response measurements at different voltage levels and frequencies. Especial attention will be paid on the partial discharge data analysis and the relation to the real condition determined from destructive analysis.

Oppgavetekst

En stor andel av det norske mellomspennings kabeldistribusjonsnettet er eldre enn den forventede levetiden på 30 år. Kabelskjøter har en kortere forventet levetid enn kablene. Mange feil har oppstått i skjøter som ble installert på 80-tallet på grunn av overoppheting av de metalliske kontaktpunktene. Generelt blir tilstanden til isolasjonen i kabelsystemet og skjøtene vurdert ved hjelp av PD-målinger. Hvordan frekvensen til den benyttede spenningen påvirker resultatene er ikke fullstendig kjent. Denne oppgaven vil derfor fokusere på relevante feltaldrede skjøter, og vurdere hvordan spenningsfrekvensen påvirker målingene.

Oppgaven vil hovedsakelig være eksperimentell. Skjøtene vil bli karakterisert ved hjelp av ikke-destruktiv diagnostikk, som innebærer PD-målinger og dielektrisk responsmåling, ved forskjellige spenningsverdier og frekvenser. Hovedfokuset vil ligge på analyse av PD-data, og sammenligning med virkelig tilstand, som vurderes ved hjelp av destruktive tester.

Forord

Masteroppgaven er gitt på bakgrunn av et samarbeid mellom SINTEF Energi AS og NTNU, utført ved Institutt for Elkraftteknikk våren 2014.

Jeg vil først og fremst rette en stor takk til hovedveileder, Førsteamanuensis Frank Mauseth ved Institutt for Elkraftteknikk, NTNU, for god oppfølging gjennom hele semesteret. Til tross for en hektisk timeplan, har Frank alltid vært behjelpelig med både praktisk og teoretisk kunnskap, når dette har vært nødvendig.

En stor takk også til Dr. Ing. Sverre Hvidsten, ved SINTEF Energi AS, for gode råd og innspill i forbindelse med utforming og gjennomføring av oppgaven.

Takk også til Hallvard Faremo, Horst Førster og Espen Eberg for god hjelp og gode innspill i forbindelse med laboratoriearbeidet.

Trondheim, juni 2014

Håkon Tollefsen

Sammendrag

Siden testmetodene for PD-målinger som gjøres i felt, utføres ved forskjellige frekvenser, er det av stor interesse for eieren av kabelsystemet å vite hvordan målingene skal tolkes, dersom resultatene er både frekvens- og spenningsavhengig.

I denne oppgaven har det derfor blitt sett på frekvensavhengighet i forhold til delutladninger i feltaldrede kabelskjøter. Tre skjøter fra samme trefase har blitt testet hver for seg, og blitt analysert ved hjelp av PRPDA-plot, pulssekvensanalyse og Weibull-analyse. I tillegg har det blitt utført en dielektrisk responsmåling.

Tennspenningen i de tre kabelskjøtene måles ved ti forskjellige frekvenser mellom 0,1 og 100 Hz. Resultatene for de åtte høyeste frekvensene (0,5 - 100 Hz) er relativt like, og tennspenningen ligger mellom 9,5 og 11,0 kV i disse tilfellene. Ved de to laveste frekvensene synker tennspenningen, og ved 0,1 Hz ligger den rundt 6 kV. Driftsspenningen til skjøtene er 6,4 kV.

Disse resultatene kan føre til feildiagnosering av kabelsystemet, ettersom PD-tester ofte utføres ved 0,1 eller 50 Hz i felt. Feildiagnosering kan være kostbart for eieren av kabelsystemet, og er naturligvis ikke ønskelig.

Både pulssekvensanalysen og Weibull-analysen antyder at det er flere utladningskilder i alle skjøtene. I tillegg er det grunn til å tro at det kan være overflateutladninger som oppstår, ut ifra plottene i pulssekvensanalysen.

Dissekering av skjøtene viser at det kan ha oppstått både overflate- og hulromsutladninger i overgangen mellom ytre halvleder og PEX-isolasjonen, på innsiden av skjøtene. I overgangen mellom de to materialene er det en høydeforskjell, som gjør at skjøten ikke krympes helt inntil kabelen. Dette gir et lite glippe mellom de to delene, hvor utladninger kan oppstå.

Abstract

Because the test methods that are used to measure partial discharges are done at different frequencies, the owner of the cable system will have a great interest in knowing how to interpret the results, if partial discharges are both frequency and voltage dependent.

Because of the different measurement methods, the focus in this thesis has been on frequency dependency of partial discharges. Three service aged cable joints, from the same three phase system, have been diagnosed using PRPDA-plots, Weibull analysis and pulse sequence analysis. In addition a dielectric response measurement has been performed on the joints.

The ignition voltage in the three joints has been measured at ten different frequencies, ranging from 0.1 to 100 Hz. The results for the eight highest frequencies (0.5 - 100 Hz) show about the same ignition voltage, ranging between 9.5 and 11.0 kV. By reducing the frequency below 0.5 Hz, the ignition voltage drops, and at 0.1 Hz it ranges between 5.5 and 6.5 kV. The operating voltage of the joints is 6.4 kV.

With these results it can be difficult to interpret measurements done on in-service cable systems, because the voltage frequencies normally used are either 50 or 0.1 Hz. A misinterpretation of the results can cause big economic losses.

Both the pulse sequence analysis and the Weibull analysis suggest that there is more than one location at which discharges are occurring in the joints. It is also assumed that some of these discharges come from surface discharges.

By dissecting the joints, it is reasonable to believe that both cavity and surface discharges could have happened inside the joints. In the transition between the semiconductor and the insulation material, there is a height difference where the impact of a high voltage test has penetrated the insulation. It is believed that this is a weak point in the insulation, because the joint has not been properly attached to the cable. This creates a void in which partial discharges can occur.

Innhold

1	Innledning	1
1.1	Bakgrunn	1
1.2	Arbeid	1
2	Teori	3
2.1	PEX-kabel	3
2.2	Partielle Utladninger	3
2.2.1	Typer Utladninger	4
2.2.2	Måling av PD	6
2.2.3	Tenn-/slukkespenning	9
2.2.4	Desintegrering av ladning	9
2.2.5	Frekvensavhengige mekanismer	10
2.3	Dielektrisk Respons	14
2.3.1	Tapsmekanismer	15
2.3.2	Polarisering	17
2.3.3	Dielektrisk analyse	19
2.3.4	Frekvensavhengighet	20
2.4	Behandling av PD-data	22
2.4.1	Faseoppløst PD-plot	22
2.4.2	Pulssekvensanalyse	23
2.4.3	Weibull-analyse	25
3	Metode	29
3.1	Beskrivelse av Testobjektene	29
3.2	Preparering av testobjektene	30
3.2.1	Terminering	30
3.2.2	Guard	30
3.3	Måling av Dielektrisk Respons	30
3.4	PD-måling	33
3.4.1	Faseforskyvning	34
3.5	Målingsrekkefølge	34
3.5.1	Dielektrisk respons	35
3.5.2	Partielle utladninger	35
3.5.3	Isolasjonsresistivitet	38
3.5.4	Gjennomslagstest	38
3.5.5	Disseksjon	38
3.6	Analysering av Måleresultater	38
3.6.1	Pulssekvensanalyse	39
3.6.2	Weibull-analyse	41

4	Måleresultater og analyse	44
4.1	Dielektrisk responsmåling	44
4.1.1	Kabelskjøt A	44
4.1.2	Kabelskjøt B	44
4.1.3	Kabelskjøt C	45
4.1.4	Forhold mellom 0,1 og 50,2 Hz	46
4.2	Tennspenningstest, PD-måling nummer 1	48
4.2.1	Frekvensavhengig tennspenning	48
4.2.2	Definering av tennspenning	49
4.3	600 Perioder, PD-måling nummer 2	50
4.3.1	Sammenligning med tennspenningstesten	50
4.3.2	Statistiske måleresultater	51
4.4	Pulssekvensanalyse (PSA)	53
4.4.1	Spenningsendring	53
4.4.2	Tidsforskjell	56
4.5	Weibull-analyse	61
4.5.1	Kumulativ fordeling	61
4.5.2	Formfaktor	63
4.5.3	Faseverdi av separerte utladninger	64
4.6	Isolasjonsresistivitet	65
4.7	Gjennomslagstest	66
4.8	Disseksjon	66
5	Diskusjon	68
5.1	Dielektrisk responsmåling	68
5.2	Tennspenning	68
5.3	600 Perioder	70
5.4	Pulssekvensanalyse	70
5.5	Weibull-analyse	72
5.6	Disseksjon	73
6	Konklusjoner	74
7	Videre Arbeid	75
A	Matlab-script	1
A.1	Eksportering av data til Matlab-filer	1
A.2	Weibull-funksjoner i Matlab	8
A.3	Script til PSA-plot	8
A.3.1	Spenningsendring	8
A.3.2	Tidsdifferanse	9

B	Preparering av kabel	11
B.1	Terminering	11
B.2	Guard	13
C	PD-målinger	16
C.1	Tennspenningstest	16
C.1.1	Frekvensavhengig Tennspenning	16
C.1.2	Utladninger ved tenning under tennspenningstesten, i Kabelskjøt A	17
C.1.3	Utladninger ved tenning under tennspenningstesten, i Kabelskjøt B	22
C.1.4	Utladninger ved tenning under tennspenningstesten, i Kabelskjøt C	27
C.2	600 perioder, PRPDA-plot	33
C.2.1	600 Perioder, Kabelskjøt A	33
C.2.2	600 Perioder, Kabelskjøt B	39
C.2.3	600 Perioder, Kabelskjøt C	43
C.3	600 perioder, Spenningsverdier og støynivå	48
C.4	Pulssekvensanalyse	49
C.4.1	Pulssekvensanalyse, Kabelskjøt A	49
C.4.2	Pulssekvensanalyse, Kabelskjøt B	60
C.4.3	Pulssekvensanalyse, Kabelskjøt C	71
C.5	Weibull	84
C.5.1	Weibull-fordeling, positive og negative utladninger	84
C.5.2	Weibull, Skala- og formfaktor, Samlet og separert	90
C.5.3	Weibull-analyse, PRPDA-plot	96
D	Testing av termineringer	102
D.1	100 Hz	102
D.2	50,2 Hz	103
D.3	20 Hz	104
D.4	10 Hz	105
D.5	5 Hz	106
D.6	2 Hz	107
D.7	1 Hz	108
D.8	0,5 Hz	109
D.9	0,2 Hz	110
D.10	0,1 Hz	111
E	Koronamåling for å finne faseforskyvning	113

F	Dielektrisk responsmåling	116
F.1	Tapsfaktor, $\tan(\delta)$	116
F.1.1	Kabelskjøt A	121
F.1.2	Kabelskjøt B	123
F.1.3	Kabelskjøt C	126
F.2	Kapasitans	129
F.2.1	Kabelskjøt A	129
F.2.2	Kabelskjøt B	131
F.2.3	Kabelskjøt C	132
G	Disseksjon	134

1 Innledning

1.1 Bakgrunn

For å vurdere tilstanden til kabelskjøter i felt, kan det utføres forskjellige ikke-destruktive tester, som blant annet innebærer PD-måling.

Hvis kabelsystemet skal testes under driftsforhold, brukes en såkalt on-line-test. Dette betyr at systemet lastes med en spenningsfrekvens på 50 Hz, ved drifts-spending. Ulempen med denne metoden er at testforholdene er begrenset til de nevnte parameterne. Tennspending er derfor ikke mulig å finne, ved bruk av denne testen. I tillegg registreres betydelige mengder støy under on-line-testing, som kan redusere nøyaktigheten til målingene.

For å kunne variere testspendingen, og unngå støy, brukes ofte en off-line-test i stedet. Dette betyr at testobjektet kobles fra nettet når det skal måles på, og forsynes av en ekstern spenningskilde. Ved bruk av en slik ekstern spenningskilde, kreves en betydelig mengde reaktiv effekt, dersom det er et langt kabelsystem som skal testes, og testen skal utføres ved 50 Hz. Dette er ikke alltid økonomisk forsvarlig, ettersom utstyret, som i så fall må brukes, er både stort og kostbart. Det er derfor vanlig å bruke en lavere frekvens, for å redusere mengden av reaktiv effekt som trengs. Denne frekvensen velges som regel til 0,1 Hz. [1] [2]

Når PD-målinger utføres ved forskjellige frekvenser, vil ikke målingene nødvendigvis gi de samme resultatene som ved 50 Hz. Dette gjør vurderingen av tilstanden til kabelskjøter vanskeligere. Ideelt sett burde en måling gjort ved 0,1 Hz si hva som skjer ved 50 Hz. Men dette er ikke nødvendigvis alltid tilfelle, om PD-aktiviteten, i tillegg til å være spenningsavhengig, er frekvensavhengig. Avhengig av hvor langt testobjektet har kommet i aldringsprosessen, og hvilke aldringsmekanismer som er dominerende, kan tester ved forskjellige frekvenser gi forskjellige resultater.

1.2 Arbeid

I denne oppgaven utføres det flere forskjellige ikke-destruktive tester, på feltaldrede kabelskjøter, for å vurdere hvordan spenningsfrekvensen spiller inn på resultatene. Testene utføres ved ti frekvenser mellom 0,1 og 100 Hz.

Hovedfokuset ligger på PD-målinger, og disse testene utføres ved det laveste spenningsnivået som fører til utladninger. To forskjellige analysemetoder benyttes for, blant annet, å vurdere frekvensavhengighet under PD-målingene. Analysemetodene er pulsskvensanalysen og Weibull-analysen.

I tillegg til PD-målingene utføres en dielektrisk responsmåling, som har hovedfokus på tapsfaktoren i isolasjonsmaterialet. Motstanden til isolasjonen måles også, ved hjelp av en megger.

Etter at alle ikke-destruktive målinger har blitt gjort, utføres en gjennomslagstest, som sier hvor mye spenning testobjektene tåler, før det oppstår gjennomslag.

Som en avsluttende diagnostikk, dissekeres skjøtene for å finne eventuelle visuelle bevis på vurderingene fra analysene.

2 Teori

2.1 PEX-kabel

Tverrbundet polyetylen (PEX) er et vanlig isolasjonsmateriale brukt i høyspentkabler. Ved hjelp av en vulkaniseringsprosess tverrbindes polyetylenmolekyler, som gir materialet en bedre evne til å tåle høyere temperaturer. Som kabelisolasjon er høyeste tillatte driftstemperatur for polyetylen 70 °C, mens den for tverrbundet polyetylen er 90 °C.[3, s.2.7].

Selv om tverrbundet polyetylen er et godt isolasjonsmateriale, vil det likevel kunne utsettes for nedbrytning av forskjellige typer. Under produksjon kan det for eksempel oppstå små hulrom i isolasjonen, som vil være svake punkter i materialet. I disse hulrommene kan det oppstå partielle utladninger.

Men de mest utsatte områdene i et kabelsystem, er skjøtene. Når to kabler skjøtes sammen, gjøres dette manuelt. Sjansen for at det kan oppstå defekter i dette området er derfor ganske stor.

2.2 Partielle Utladninger

Partielle utladninger defineres som lokale elektriske utladninger som kun delvis bryter ned isolasjonen[4, s.15]. For at en utladning skal skje er det to kriterier som må oppfylles. For å starte hele prosessen kreves det et elektrisk felt som er sterkt nok til å starte et lokalt elektrisk kred. Dette betyr at feltstyrken må overgå holdfastheten til materialet hvor utladningen oppstår. I isolasjonshulrom, og rundt spisse kanter, forsterkes det ytre elektriske feltet, som gir større sjanse for utladninger.

I tillegg til det nevnte kravet, kreves det at det er et startelektron til stede, som kan akselereres av det elektriske feltet, og starte skredet. Dette siste kriteriet er en stokastisk variabel, og partielle utladninger er derfor et stokastisk fenomen.[5, s.8] På engelsk kalles slike utladninger for "partial discharges", med forkortelsen PD. Videre i denne rapporten brukes forkortelsen PD for denne typen utladning.

Utladningsstørrelse: Utladninger kan karakteriseres på flere måter. En vanlig parameter å bruke, er størrelsen på selve utladningen, som oppgis i coulomb [C]. For delutladninger i dielektrisk isolasjonsmateriale er det vanlig å oppgi utladninger i picocoulomb [pC] (pico = 10^{-12}).

Siden utladninger er transiente strømmer, er det vanlig å definere størrelsen ved å integrere strømsignalet over tid [6, s.10]. Størrelsen på en utladning (q), er proporsjonal med det lokale elektriske feltet, som betyr at de minste utladningene finner sted når det lokale feltet er lik den lokale holdfastheten [7, s.3/30].

PD regnes som en av de viktigste nedbrytningsmekanismene i isolasjonen, og det er derfor viktig å prøve å unngå slike utladninger så godt det lar seg gjøre.[5, s.3]

Tre av hovedkategoriene av PD som kan oppstå er [5, s.9]:

1. Hulromsutladninger
2. Overflateladninger
3. Koronautladninger

2.2.1 Typer Utladninger

Hulromsutladninger

Hulromsutladninger oppstår i gass- eller væskefylte hulrom, som befinner seg i isolasjonsmaterialet. Dersom et slikt hulrom er fylt med gass, vil det maksimale elektriske feltet i hulrommet være [8, s.206] :

$$E_h = \frac{3\varepsilon_r}{1 + 2\varepsilon_r} \cdot E \quad (2.1)$$

Den relative permittiviteten og det elektriske feltet til isolasjonen er her henholdsvis ε_r og E . Den maksimale forsterkningen av det elektriske feltet i hulrommet (E_h) vil da være 1,5 i forhold til isolasjonen.

Dersom hulrommet er flatt og vinkelrett på det elektriske feltet blir forsterkningen:

$$E_h = \varepsilon_r \cdot E \quad (2.2)$$

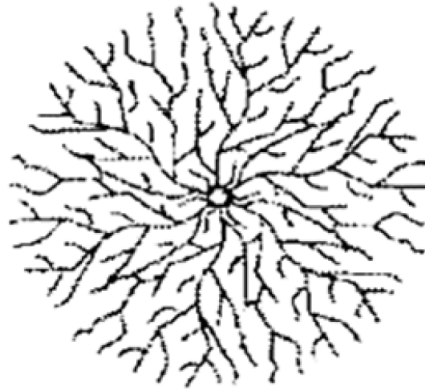
Siden feltstyrken i isolasjonsmaterialet er dimensjonert ut ifra ε_r (> 1) til nettopp dette materialet, vil en forsterkning i et hulrom kunne være kritisk i forhold til å få utladninger. Holdfastheten til hulrommet vil i slike tilfeller følge Paschen-kurven, som er avhengig av spenning og trykk. [8, s.63]

ABC-modellen

For å beskrive hvordan hulromsutladning kan detekteres i isolasjonsmateriale, som utsettes for alternerende spenning, brukes abc-modellen. Denne modellen består av tre kondensatorer (Figur 2.2 b)). Kondensator "c" representerer hulrommet hvor utladningen oppstår, mens "b" er resten av tverrsnittet over og under hulrommet, og derfor i serie med "c". Kondensator "a", representerer resten av isolasjonsmaterialet, og er derfor mye større enn "c".

Overflateutladninger

Overflateutladninger oppstår i grenseoverflaten mellom to forskjellige materialer. Dette kan både være mellom to forskjellige isolasjonsmaterialer og mellom halvleder og isolasjon. Mønsteret som oppstår for overflateutladninger kalles for Lichtenbergsfigurer, og er vist i Figur 2.1. [9, s.93]



Figur 2.1: Utladningsmønsteret for overflateutladninger: Lichtenbergfigur [9, s.94]

I områder hvor overflateutladninger forekommer, kan materialet karboniseres. Dette vil kunne føre til høyere ledningsevne i området, på grunn av det ledende karbonet.

Koronautladninger

Koronautladninger oppstår i områder hvor det elektriske feltet er så høyt at gassen i området rundt ioniseres. En slik feltforsterkning oppstår som regel rundt spisse kanter, og finner sted ved den påtrykte spenningens toppverdi.

Dersom det oppstår slike koronautladninger, kan koronaringer eller -kuler brukes for å jevne ut feltet. Dette reduserer sjansen for koronautladninger.

2.2.2 Måling av PD

Måling av PD i felt

Det er to hovedmetoder som kan brukes for måling av PD i felt. On-line-testing foregår mens kabelen er i normaldrift, mens off-line-testing foregår når kabelen er koblet fra nettet.

Fordelen med on-line-testing er at kabelen kan påføres variert last, som gir mulighet til å finne den eventuelle feiltypen. I tillegg kreves det ingen utkobling av selve kabelen. Likevel er det kun driftsspenning og -frekvens som kan brukes som testforhold, samtidig som det kan være mye støy som plukkes opp under målingene.

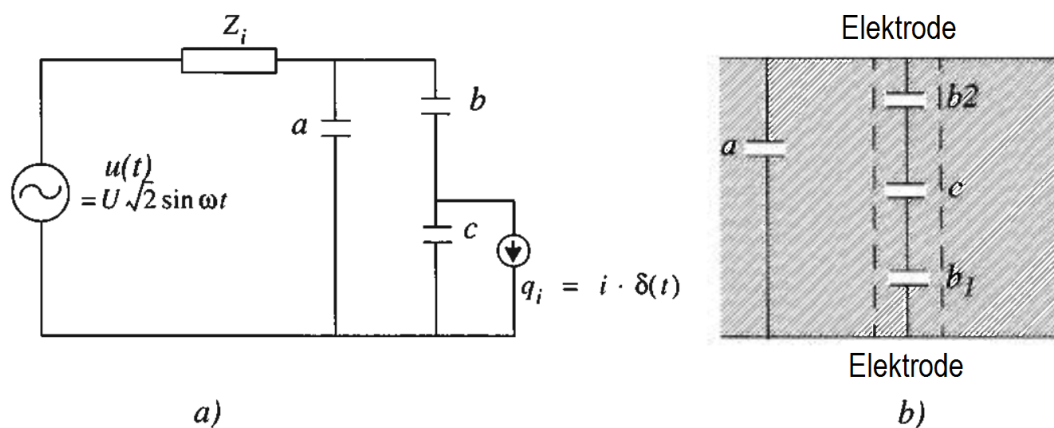
Off-line-testing krever at kabelen er koblet fra nettet når testingen pågår. Fordelen med denne metoden er at tenn- og slukkespenning kan finnes. I tillegg kan også feiltypen finnes, ved å variere påtrykt spenning.

Et generelt krav for begge metodene er at testen ikke skal kunne gjøre noe skade på selve kabelen. I tillegg er det viktig med høy sensitivitet, for å kunne detektere så nøyaktig som mulig. [10, s.16-17]

For off-line-testing er det flere forskjellige spenningskilder som kan brukes. Det som skiller dem fra hverandre er både spenningsnivå og frekvens:

1. Sinus AC: 20 - 300 Hz [10, s.23]
2. VLF (Very Low Frequency): Vanligvis 0,1 Hz [10, s.24]
3. DAC (Damped AC): I området 10 Hz til noen kilohertz [10, s.25]
4. Impulsspenning

I denne oppgaven vil fokuset ligge på tester utført ved sinusspenninger mellom 0,1 og 100 Hz. De to første testene, nevnt over, er derfor aktuelle.



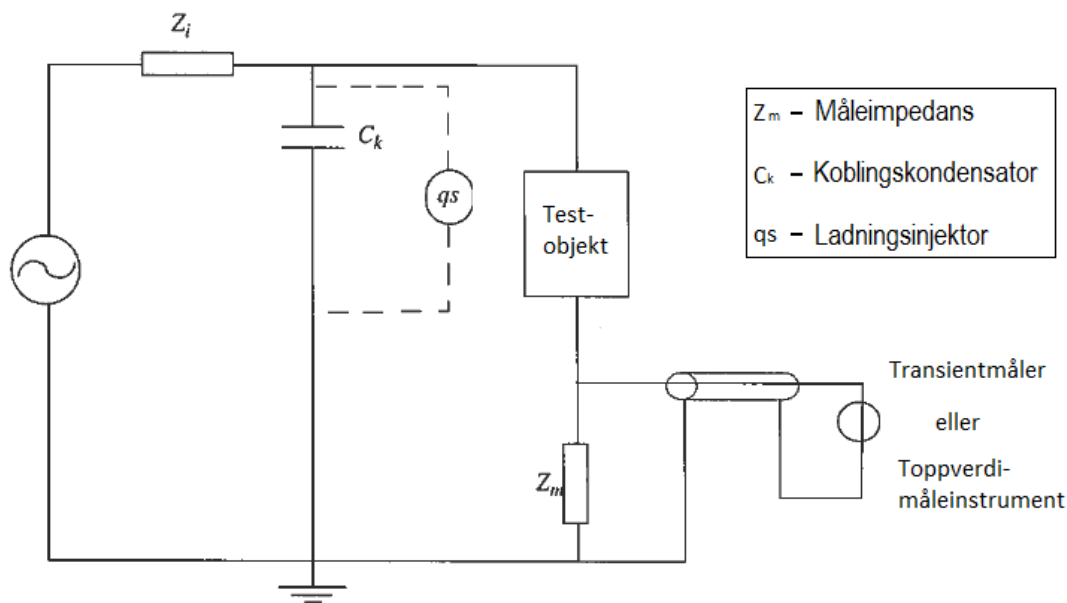
Figur 2.2: ABC-ekvivalentkrets [8, s.208]. For å representere et hulrom, brukes ABC-modellen. Her er c selve hulrommet, mens b er området over og under hulrommet. a er resten av isolasjonsmaterialet

$$b < c$$

$$c \ll a$$

Måling av PD på Lab

Et tradisjonelt måleoppsett for detektering av PD er vist i Figur 2.3. Testobjektet er koblet i serie med måleimpedansen Z_m . Disse er igjen koblet i parallell med koblingskondensatoren, C_k . Når det oppstår en utladning i testobjektet vil det være et spenningsfall der hvor feilen skjer. Koblingskondensatoren vil da levere en strøm (Δi) til testobjektet, for å kompensere for spenningsfallet. Strømmen Δi er et transient signal som kan detekteres i måleimpedansen [5, s.12].



Figur 2.3: Målekrets PD [8, s.215]. Testobjektet er koblet i serie med måleimpedans Z_m . Koblingskondensatoren, C_k , er koblet i parallell med de to andre komponentene. PD i testobjektet måles i Z_m

Signalet som måles i den ytre kretsen, er ikke den virkelige strømmen som går i hulrommet, men en tilsynelatende strøm. Dette betyr at den målte utladningen heller ikke er den faktiske utladningen som oppstår i hulrommet. Spenningspranget over testobjektet (ΔU) vil gi en strøm i den ytre kretsen som tilsvarer en tilsynelatende ladning[5, s.14]

$$Q_{\text{tilsynelatende}} = \int \Delta i \cdot dt = \Delta U \cdot C_a \quad (2.3)$$

hvor C_a er kapasitansen til testobjektet, hvis det antas at $b < c$ og $c \ll a$. Den målte utladningen vil altså være avhengig av kapasitansen til prøveobjektet og C_k .

Kalibrering

For å finne den faktiske utladningen som oppstår, kalibreres kretsen for hvert testobjekt. Dette gjøres ved å sende inn en kjent ladning på C_k , som måles i den ytre kretsen. Forholdet mellom den kjente og målte ladningen brukes så for å finne de faktiske utladningene under PD-målingen. For å sende inn ladninger av kjent størrelse, brukes en kalibrator. I Figur 2.3 vises det hvor denne kalibratoren kobles inn (qs).

$$Q_{\text{faktisk, test}} = Q_{\text{tilsynelatende, test}} \cdot \frac{Q_{\text{faktisk, kalibrering}}}{Q_{\text{tilsynelatende, kalibrering}}} \quad (2.4)$$

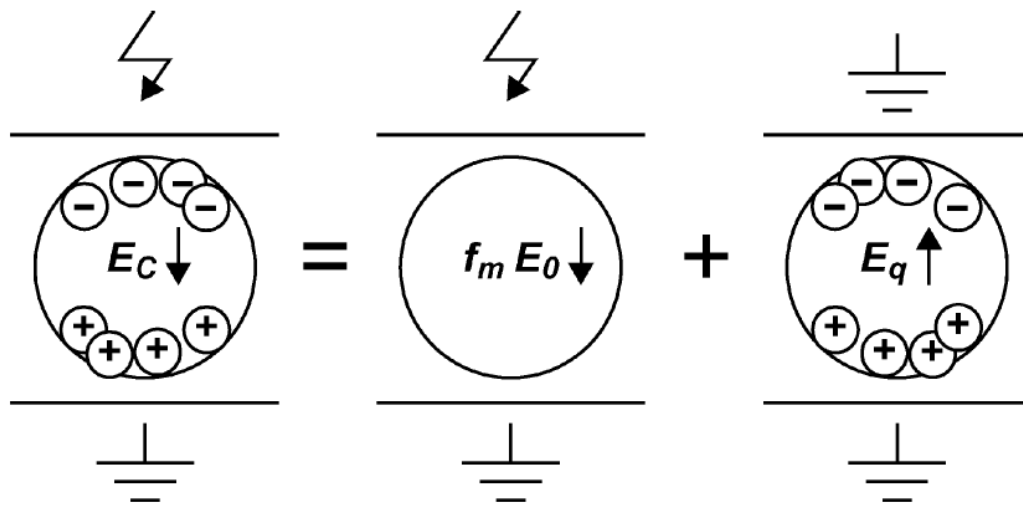
2.2.3 Tenn-/slukkespenning

Ved å gradvis øke spenningen over et testobjekt vil det til slutt oppnås tennspenning. Dette er den laveste spenningen som gir utladninger i testobjektet. Ved ytterligere økning av spenningen vil antall utladninger øke. Disse vil først finne sted ved spenningens stigende flanker. [6, s.15]

Dersom tennspenning er oppnådd, og spenningen reduseres, vil det fremdeles kunne være utladninger i testobjektet. Utladningene vil ikke opphøre før slukkespenning er oppnådd, som da vil være lavere enn tennspenningen. [6, s.15]

2.2.4 Desintegrering av ladning

Dersom det oppstår utladninger i en defekt, vil det være to forskjellige elektriske felt som kan påvirke dette, som vist i Figur 2.4. Det første feltet settes opp av den påtrykte spenningen, som forsterkes i en eventuell defekt. Det andre feltet påvirkes av lokale ladninger som er til stede i defekten, enten i form av romladning, eller ladning på overflaten til isolasjonsmaterialet. [11, s.5/514]



Figur 2.4: Elektrisk felt i et dielektrisk bundet hulrom, med påvirkning både fra påtrykt spenning og ladninger i hulrommet. f_m er forsterkningsfaktoren, som kvantifiserer forsterkningen av feltet som settes opp av den påtrykte spenningen (E_0). E_q er det elektriske feltet fra rom- og/eller overflateladning som er i hulrommet. Summen fra disse to bidragene tilsvarer det totale elektriske feltet i hulrommet (E_c). [7, s.3/30]

Ladningen som blir igjen etter en utladning, har to forskjellige egenskaper som kan påvirke den neste utladningen. For det første skaper den en potensialforskjell i den aktuelle defekten, som enten kan ha samme eller motsatt retning, i forhold til feltet satt opp av den eksterne spenningen. I tillegg gir den tilgjengelighet av startelektroner.[11, s.12/521]

Men selv om en utladning gir tilgjengelig ladning for en ny utladning, vil ladningen desintegreres over tid. I enkelte tilfeller vil den bli helt borte, og derfor ikke hjelpe til med å starte en ny utladning. Avhengig av defekttype og materialene som omslutter defekten, kan ladningen desintegrere på flere forskjellige måter.[11, s.12/521]

Overflateladningen i et hulrom vil desintegreres med en tidskonstant (τ_{SC}) vist i [11, s.12/521]:

$$\tau_{SC} = \frac{\epsilon_0 r_c}{2\sigma_s} \quad (2.5)$$

Hvor ϵ_0 er permittiviteten i vakuum, r_c er radiusen til den ledende flaten og σ_s er konduktiviteten til overflaten i defekten.

Ladning kan hentes fra overflaten i et hulrom på flere forskjellige måter. Antall elektroner som genereres per sekund kan beregnes, dersom prosessen overholder Richardson-Schottky-effekten.[7, s.3/30]

2.2.5 Frekvensavhengige mekanismer

Utladningsaktivitet vil kunne være avhengig av frekvensen til den påtrykte spenningen. Dette kan gi forskjellige resultater, dersom det måles ved forskjellige frekvenser. De neste avsnittene tar for seg diverse mekanismer som kan gi opphav til varierende resultater, ved forskjellige frekvenser.

Tidsforsinkelse

Tiden mellom tidspunktet når det elektriske feltet i et utladningsområde er stort nok, og tidspunktet det faktisk oppstår en utladning, kalles for statistisk tidsforsinkelse. Denne forsinkelsen kan deles inn i to forskjellige deler.

Tiden det tar fra tennspenning er oppnådd til den første utladningen skjer, kalles for initial tidsforsinkelse (Δt_{inc}), ”inception timelag” på engelsk.

I tillegg til initial-tidsforsinkelsen, vil det være en viss tid mellom hver enkelt utladning. Denne tidsforsinkelsen er ofte mye kortere enn Δt_{inc} , på grunn av tiljen-

geligheten av ekstra elektroner etter første utladning. Som følge av tidsforsinkelsen mellom ladningene oppstår det en faseforskyvning gitt av [12, s.15]:

$$\Delta\phi_{lag} = \frac{\Delta t_{lag}}{T} \cdot 360^\circ \quad (2.6)$$

Effekten fra de to tidsforsinkelsene vil reduseres ved lave frekvenser, og påvirke antall utladninger som oppstår. [12, s.15]

Dersom den statistiske tidsforsinkelsen er i samme område som periodetiden til den påtrykte spenningen, oppstår utladninger ved en høyre spenningsverdi, på grunn av mangel av frie elektroner. Som en konsekvens av dette oppstår det færre utladninger per periode, med høyere utladningsamplitude. Grunnen til at denne effekten økes ved høyere frekvenser er på grunn av kortere tid over tennspenningsnivået. [13, s.2].

Ved å se på tidskonstanten τ_{SC} (Ligning 2.5), kan faseforskyvningen forklares ved hjelp av desintegrering av ladning. Dersom periodetiden til den påtrykte frekvensen er liten nok, vil det fremdeles være ladning til stede når det elektriske feltet igjen når tenningsnivå. Kombinasjonen av feltet fra ladningene, og feltet fra den påtrykte spenningen, gir tenning ved et annet spenningsnivå enn forrige utladning. Avhengig av retningen til feltet fra ladningene skjer utladningen ved en tidligere eller senere faseverdi.

Men dersom periodetiden er lang nok til at alt av ladning har desintegrert, vil den neste utladningen kun være avhengig av feltforsterkningen fra den påtrykte spenningen. Dette gir ikke opphav i faseforskyvning mellom utladningene.

Spenningsfrekvensen kan på denne måten påvirke utladningsaktiviteten som oppstår i en eventuell defekt.

Endring av permittivitet

Endringen i permittivitet er forklart nærmere i kapittel 2.3.2. Effekten denne endringen har på PD-aktiviteten kan forklares ved hjelp av Ligning 2.1 og 2.2. Forsterkningen av feltet i hulrommet endres dersom permittiviteten til isolasjonsmaterialet endres [12, s.16]. Dette gjør at tennspenningen vil kunne være avhengig av frekvensen til den påtrykte spenningen. Ut ifra Ligning 2.1 og 2.2, vil den høyeste forsterkningen skjer når permittiviteten har sin høyeste verdi. Dette vil være tilfelle ved lave frekvenser (se Figur 2.8).

Overflatekonduktivitet

Ved tilstrekkelig lav frekvens vil overflatekonduktiviteten forhindre oppbygging av elektrisk felt i eventuelle hulrom. Dette vil være med på å hindre PD-aktivitet. Overflatekonduktivitet har altså en beskyttende effekt, i forhold til partielle utladninger.[12, s.18]

Konduktivitet ellers i materialet

Ledningsevnen ellers i materialet vil også kunne påvirkes av frekvensen til den påtrykte spenningen. Ved å anta frekvensuavhengig permittivitet ($\varepsilon'' = 0$), er den komplekse permittiviteten gitt ved:

$$\tilde{\varepsilon}_r(\omega) = \varepsilon'_r - j \frac{\sigma_{DC}}{\omega \varepsilon_0} \quad (2.7)$$

Når frekvensen går mot null, vil spenningen over et hulrom bestemmes av konduktiviteten. I grensetilfellet ($\omega = 0$), som betyr DC, er spenningen over hulrommet lik den påtrykte spenningen. Dette ekstremtilfellet brukes bare for å demonstrere hva som skjer ved redusert frekvens.

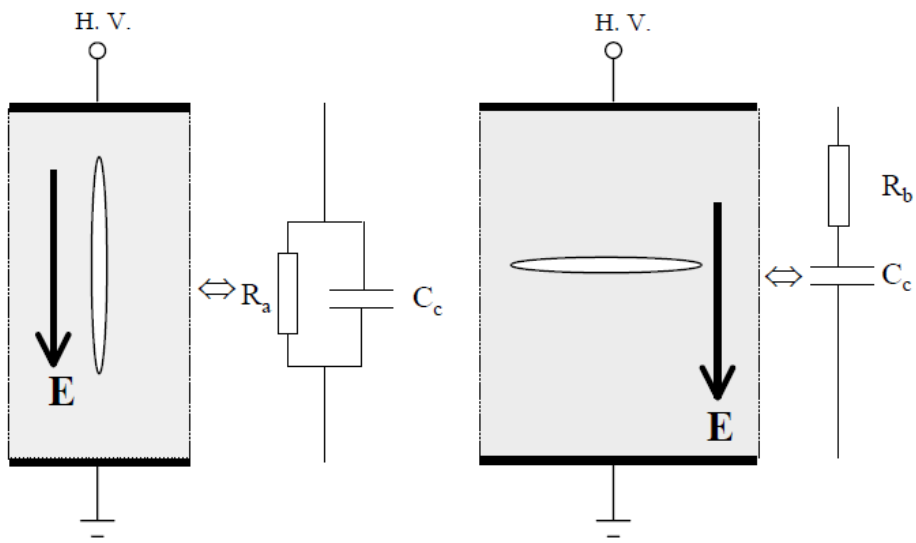
$$V_{hulrom} = \frac{V_0}{1 + \frac{1}{\varepsilon'_r - j \frac{\sigma_{DC}}{\omega \varepsilon_0} \cdot \frac{d_b}{d_h}}} \xrightarrow{\omega \rightarrow 0} \frac{V_0}{1 + \frac{j\omega \varepsilon_0 d_b}{\sigma_{DC} d_h}} \quad (2.8)$$

d_b og d_h er henholdsvis tykkelsen til isolasjonsmaterialet og hulrommet. σ_{DC} er konduktiviteten til isolasjonen, ε_0 vakuumpemittiviteten og V_0 den påtrykte spenningen. [12, s.17]

Flate hulrom

Dersom et flatt hulrom er parallelt med det elektriske feltet, vil overflatekonduktivitet være med på å skjerme hulrommet for utladninger, som tidligere forklart.

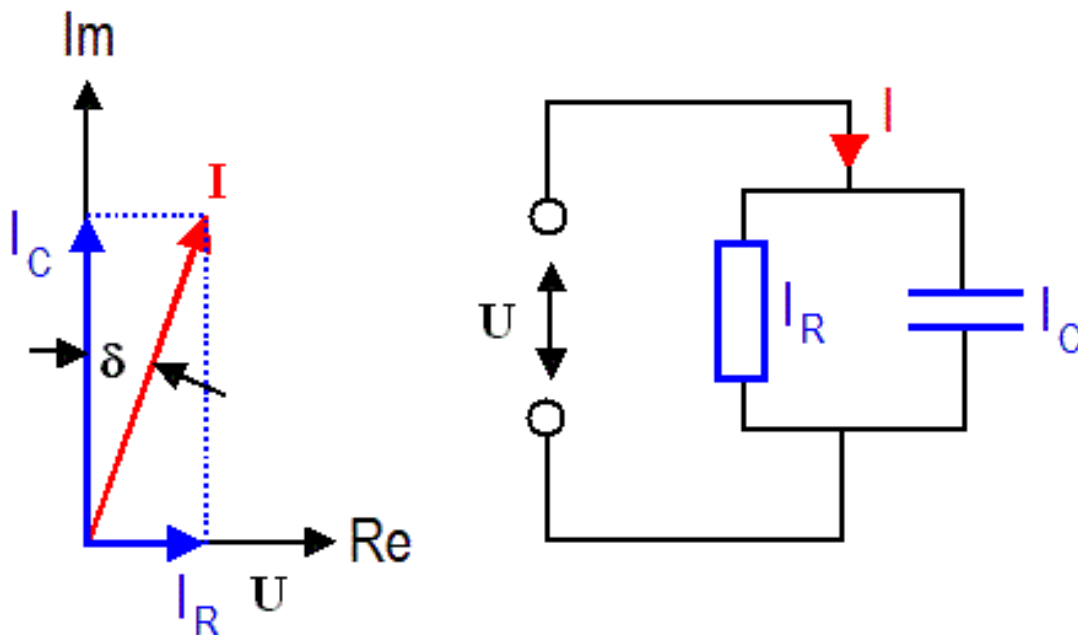
Dersom hulrommet derimot står vinkelrett på det elektriske feltet, som vist i Figur 2.5 b), vil forsterkningen i hulrommet øke ved redusert frekvens, og gi flere utladninger for lave frekvenser.[12, s.140]



Figur 2.5: Flatt hulrom i isolasjonsmateriale. [12, s.141]

2.3 Dielektrisk Respons

En annen mekanisme som kan føre til nedbrytning av isolasjonsmaterialet er dielektriske tap. Isolasjonsmaterialet i en kabel kan bli sett på som en kondensator, på grunn av de kapasitive virkningene mellom leder og ytre halvleder. En ekvivalentkrets for en slik kondensator vises i Figur 2.6.



Figur 2.6: Ekvivalentkrets for tap i kondensator. I_R er resistiv strøm, mens I_C er kapasitiv strøm i isolasjonen. [8, s.139]. Figuren har blitt modifisert, men viser likevel det samme som referansen.

Kondensatoren i Figur 2.6 representerer den tapsfrie delen av ”isolasjonskondensatoren”, mens motstanden representerer dielektriske tap som gir varmeutvikling. Det er når varmeutviklingen blir tilstrekkelig stor at denne mekanismen gir betydelige skader på isolasjonen. I verste fall kan det medføre termisk sammenbrudd.

Strømmen igjennom kondensatorkretsen i Figur 2.6 består av en reell og en imaginær komponent. Dersom kondensatoren er ideell, vil den reelle delen av strømmen vært lik null, og kondensatoren vil vært tapsfri. Når dette ikke er tilfelle, og I_R har en absoluttverdi større enn null, vil totalstrømmen forskyves med en grad δ , i forhold til imaginæraksen. Denne vinkelen kalles for tapsvinkelen.

Tapsfaktoren, $\tan \delta$ er vanlig å bruke i sammenheng med dielektriske tap. Denne

verdien bestemmes av strømmene I_R og I_C [8, s.139]

$$\begin{aligned}\tan\delta &= \frac{I_R}{I_C} \\ &= \frac{U/R}{U/X_C} \\ &= \frac{X_C}{R}\end{aligned}\tag{2.9}$$

Ligningen for reaktansen til en kondensator er:

$$X_C = \frac{1}{\omega C}\tag{2.10}$$

Dette gir da:

$$\tan\delta = \frac{1}{\omega RC}\tag{2.11}$$

Ut ifra Ligning 2.11 er det ønskelig å ha så stor motstand i isolasjonsmaterialet som mulig, som også betyr lav ledningsevne, for å redusere tapene.

Tapene uttrykt ved $\tan\delta$ er:

$$\begin{aligned}P &= \frac{U^2}{R} \\ &= U^2\omega C\tan\delta\end{aligned}\tag{2.12}$$

hvor U er spenningen over isolasjonsmaterialet, ω er vinkelfrekvensen og C er kapasitansen til isolasjonsmaterialet.

2.3.1 Tapsmekanismer

Noen vanlige tapsmekanismer som kan oppstå i isolasjonsmaterialer er:

1. Konduktive Tap
2. Dipoltap
3. Grenseflatetap
4. Partielle utladninger

Konduktive Tap

Et dielektrisk materiale vil alltid, til en viss grad, være i stand til å lede strøm. Små lekkstrømmer går gjennom materialet, på grunn av denne ledeevnen. Faktorer som påvirker konduktiviteten er forurensing i materialet og fuktighet.

Ved å variere frekvensen kan konduktive tap detekteres. Ved å senke frekvensen vil de konduktive tapene bli synlige. Dette er fordi den resistive strømmen er uendret, mens den kapasitive strømmen reduseres med en faktor lik frekvensen. Fra Ligning 2.9 økes derfor tapsfaktoren, når frekvensen reduseres.

Dipoltap

Enkelte molekyler har en usymmetrisk plassering av elektroner. Dette gjør at disse molekylene vil ha et elektrisk potensialforskjell over seg, som er en permanent dipol. Dersom et slikt molekyl plasseres i et elektrisk felt, vil dette dipolmomentet rette seg etter feltet. Dette gjelder både for stasjonære og alternerende felt. [8, s.124]

Ved lave frekvenser vil dipolene enkelt kunne følge endringen. Men etterhvert som frekvensen økes, vil dipolene ha problemer med å følge feltendringen. Dette gir intern friksjon i molekylkjedene, og fører til tap i materialet. Med ytterligere økning av frekvensen vil dipoltapene etterhvert reduseres, og ved høye nok frekvenser opphøre helt. Dette er fordi dipolmolekylene ved tilstrekkelig høye frekvenser ikke klarer å følge det elektriske feltet i det hele tatt.

Dipoltap oppstår i frekvensområdet $10^6 - 10^{10}$ Hz [8, s.131].

Grenseflatetap

Internt i et isolasjonsmateriale kan det være områder hvor det finnes forurensning. Dette er områder som oppstår siden atomer, ioner og molekyler ikke alltid vil være ideelt plassert. Dersom det i tillegg er frie elektroner til stede i isolasjonsmaterialet, vil disse kunne bevege seg mot de urene grenseflatene, og skape et lokalt elektrisk felt. Slike lokale polariserte områder gir opphav i grenseflatetap. [8, s.124-125]

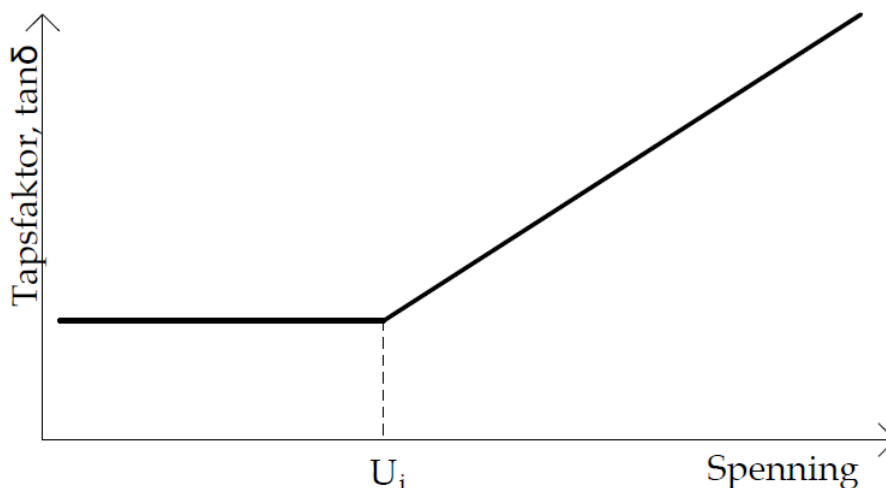
I et materiale som PEX vil det både være amorfe og krystalline områder. I grenseflatene mellom disse områdene vil det kunne oppstå grenseflatetap.

I tilfeller hvor flere forskjellige materialer brukes som isolasjon, vil det også kunne oppstå grenseflatetap i overgangen fra ett materiale til et annet.

Grenseflatetap oppstår i frekvensområdet $0 - 10^7$ Hz [8, s.131].

Partielle utladninger

Partielle utladninger vil og gi opphav i tap. Dette vil være tilfelle, dersom det opereres med spenninger høyere enn tennspenningen til testobjektet (se kap. 2.2.3). I så fall vil tapene øke ved økende spenning. Dette er vist i figur 2.7. [9, s.100]



Figur 2.7: Tap fra partielle utladninger, som funksjon av påtrykt spenning. U_i er tennspenningen. [9, s.101]

2.3.2 Polarisering

Av tapsmekanismene som er beskrevet i Kapittel 2.3.1 er to av eksemplene polariseringsmekanismer. Dette vil si at de har en viss evne til å rette seg etter det alternerende elektriske feltet.

De fire forskjellige typene av polarisering som kan oppstå i et dielektrisk materiale er:

1. **Elektronisk polarisering:**

Dersom et atom plasseres i et elektrisk felt, vil elektronene som sirkulerer rundt cellekjernene konsentreres på den ene siden av atomet. Dette gir en midlertidig dipol, som vil være proporsjonal med det påtrykte feltet. [8, s.124]

2. **Ionisk polarisering:**

Molekyler som har ioniske bindinger består av en sammensetning av positive

og negative ioner. Disse molekylene vil ikke ha noe dipolmoment, dersom det ikke er et elektrisk felt til stede. Men dersom de plasseres i et elektrisk felt, vil de rette seg etter feltet, og skape et dipolmoment.[8, s.124]

3. **Orienteringspolarisering:** Denne typen polarisering er beskrevet i kapittel 2.3.1, og gir opphav i dipoltap. Molekyler med usymmetrisk fordeling av elektroner er permanente dipoler, og vil rette seg etter et eventuelt elektrisk felt.[8, s.124]
4. **Grenseflatepolarisering:** Denne typen polarisering er og beskrevet i kapittel 2.3.1, og gir grenseflatetap. I enkelte områder av materialer kan det oppstå lokale elektriske felt, som reduserer den dielektriske egenskapen til materialet. Dette kan skje både i overgangen fra ett materiale til et annet, og internt i ett type materiale.[8, s.124]

Frekvensavhengig polarisering

Både elektronisk og ionisk polarisering er prosesser som skjer momentant. De to siste derimot, kan bruke en viss tid på å reagere på en eventuell endring av det elektriske feltet. Disse kalles ofte for relaksjonsmekanismer, og kan under visse forhold redusere permittiviteten til et materiale.

Ved lave frekvenser vil ikke relaksjonsmekanismene ha noe problem med å henge med det elektriske feltet. Hvis så er tilfelle, vil den elektriske flukstettheten være i fase med det elektriske feltet. Men dersom frekvensen blir tilstrekkelig høy, vil feltendringen være så stor at de lokale dipolene henger etter det ytre feltet. Den elektriske flukstettheten (D), vil da henge etter det elektriske feltet med et gitt intervall (τ), ved en bestemt frekvens.

Den elektriske flukstettheten til materialet er gitt som:

$$D(t) = \varepsilon_0 E(t) + P(t) \quad (2.13)$$

hvor $P(t)$ er polariseringen til materialet.

Uttrykket for polarisering deles opp i to ledd:

$$P(t) = P_{momentan}(t) + P_{relaksjon}(t) \quad (2.14)$$

hvor $P_{momentan}$ er de momentane polariseringsmekanismene, mens $P_{relaksjon}$ er relaksjonsmekanismene.

Relaksjonsmekanismene kan uttrykkes ved den dielektriske responsfunksjonen ($f(t)$) [14]:

$$P_{relaksjon}(t) = \varepsilon_0 \int_0^t f(\tau)E(t - \tau)d\tau \quad (2.15)$$

Den dielektriske responsfunksjonen har følgende karakteristik [14]:

$$f(t) \equiv 0 \quad \forall t < 0 \quad \text{og} \quad \lim_{t \rightarrow \infty} = 0 \quad (2.16)$$

2.3.3 Dielektrisk analyse

Dielektrisk respons kan måles i enten tids- eller frekvensdomene. I tidsdomene påføres en DC-spenning, og strømmen i isolasjonen måles over tid. I frekvensdomene påføres en alternerende spenning, slik at kapasitans og dielektriske tap kan måles som funksjon av frekvens. [15, s.3]

For måling av tilstanden til kabelisolasjonen finnes det flere kommersielt tilgjengelige metoder, som baserer seg på dielektrisk respons.

Parameterne som kan måles for frekvens- og tidsdomene er:[15, s.3]

Frekvensdomene-metode: Kompleks permittivitet ($\varepsilon''(f)$), endring av kapasitans ($\Delta\varepsilon'(f)$) og dielektrisk tapsfaktor ($\tan\delta$), som funksjon av frekvens og spenning.

Tidsdomene-metode: Depolariseringsstrømmer ($I_D(t)$) og tilbakevendende spenning ($U_R(t)$), som funksjon av tid.[15, s.3]

Ved å kombinere Ligning 2.13 og 2.15 kan strømtettheten til isolasjonsmaterialet uttrykkes som:

$$J(t) = (\sigma \cdot E(t)) + \varepsilon_0 \frac{d}{dt} \left[(\varepsilon_r \cdot E(t)) + \int_0^t f(\tau)E(t - \tau)d\tau \right] \quad (2.17)$$

Hvor σ er konduktiviteten til isolasjonsmaterialet, og ε_r er den relative permittiviteten.

I frekvensdomene blir uttrykket for strømmen i isolasjonsmaterialet [15, s.7]:

$$I(\omega) = \omega C_o U_o(\omega) \left[\left(\frac{\sigma}{\omega \varepsilon_o} + \chi''(\omega) \right) + j(\varepsilon_r + \Delta\varepsilon_r(\omega)) \right] \quad (2.18)$$

der $\omega = 2\pi f$, og f er spenningsfrekvensen, U_o er påtrykt spenning, C_o er kapasitansen til testobjektet, ε_r er relativ permittivitet, $\Delta\varepsilon_r$ er endring i kapasitans og $\chi''(\omega)$ er den elektriske susceptibiliteten, som representerer den dielektriske responsfunksjonen $f(t)$ i tidsdomene (Ligning 2.15).

Forholdet mellom frekvens- og tidsdomene finnes ved bruk av fouriertransformasjon [15, s.3].

Videre i denne rapporten er det målinger i frekvensdomene som er mest aktuelle, og det vil derfor fokuseres på denne metoden.

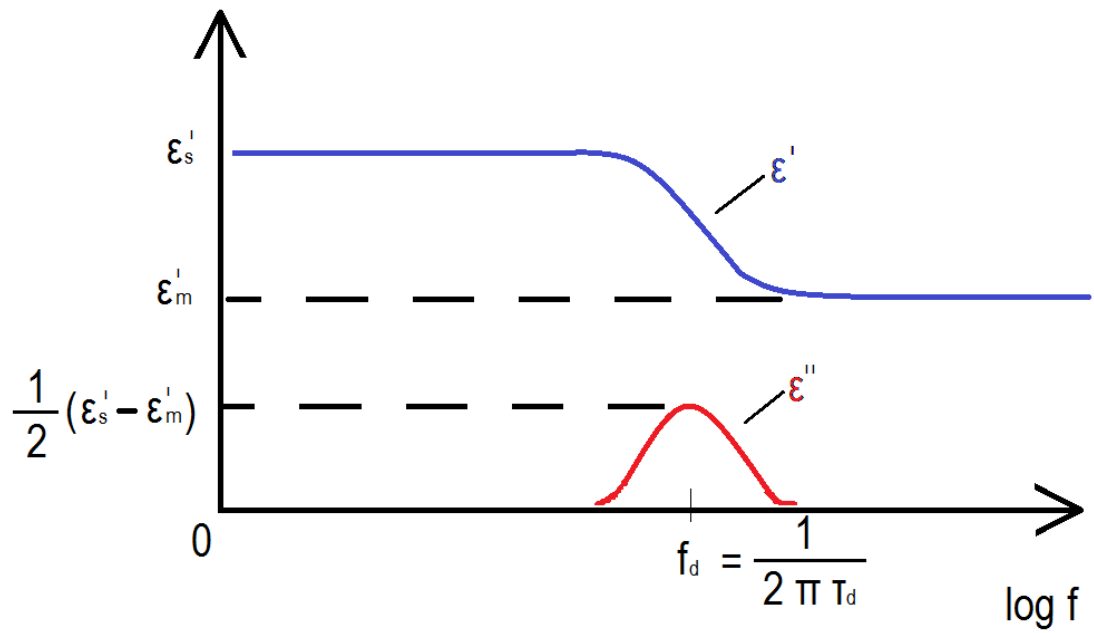
2.3.4 Frekvensavhengighet

Permittiviteten til materialet vil endres ved varierende frekvens. Denne endringen er vist i Figur 2.8, som også representerer dipolens evne til å følge det påtrykte elektriske feltet. Ved lave frekvenser vil permittiviteten være konstant og rent reell. Når frekvensen blir så høy at dipolene ikke klarer å følge feltet, betyr det at også permittiviteten henger etter. Den elektriske flukstettheten er produktet av permittiviteten og det elektriske feltet, og vil derfor henge etter det elektriske feltet med samme vinkel som permittiviteten.

$$\vec{D} = D \cdot e^{-j\delta} = \varepsilon_0 \vec{E} + \vec{P} = (\varepsilon'_r - j\varepsilon''_r) \varepsilon_0 \vec{E} \quad (2.19)$$

Når dette er tilfelle, vil permittiviteten bestå av en reell, og en imaginær komponent. I Figur 2.8 er den reelle delen av permittiviteten representert av graf ε' , mens den imaginære delen er representert av graf ε'' .

$$\begin{aligned} \varepsilon_r^* &= \varepsilon' + j\varepsilon'' \\ &= \chi(\omega)' + j(\chi(\omega)'' + \frac{\sigma}{\omega\varepsilon_0}) \end{aligned} \quad (2.20)$$



Figur 2.8: Endring av permittivitet som funksjon av frekvens, ved én relaksjonsmekanisme. [8, s.133]

Forholdet mellom den imaginære og reelle delen av permittiviteten gir tapsfaktoren $\tan\delta$ [15, s.7]:

$$\epsilon''(\omega) = \frac{\sigma}{\omega\epsilon_0} + \chi''(\omega) \quad (2.21)$$

$$\epsilon'(\omega) = \epsilon_r + \Delta\epsilon_r(\omega) \quad (2.22)$$

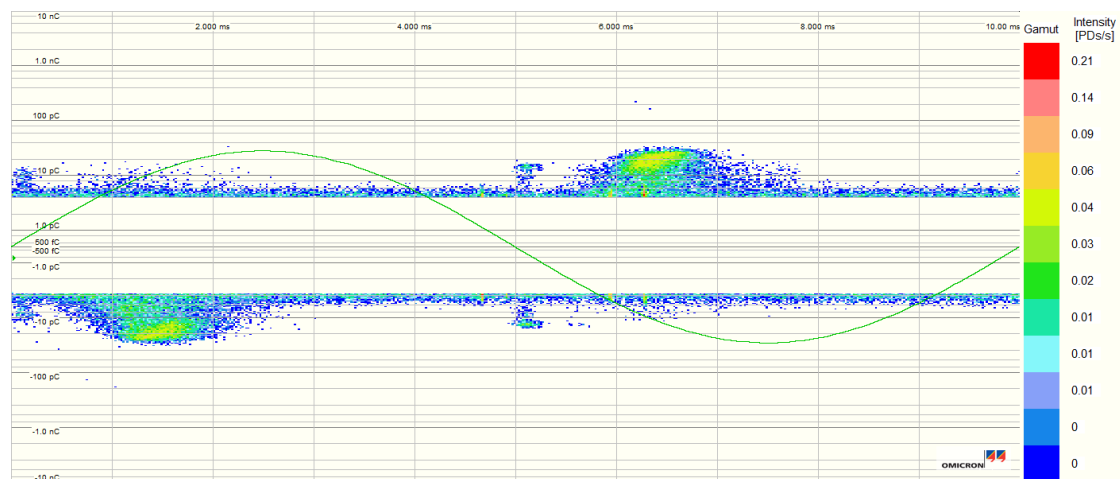
$$\tan \delta = \frac{\epsilon''(\omega)}{\epsilon'(\omega)} = \frac{\epsilon''(\omega)}{\epsilon_r + \Delta\epsilon_r(\omega)} \approx \frac{\epsilon''(\omega)}{\epsilon_r} \quad (2.23)$$

2.4 Behandling av PD-data

2.4.1 Faseoppløst PD-plot

Ved å påtrykke sinusspenning over et testobjekt, vil det med høy nok spenning, oppstå utladninger ved forskjellige faseverdier av spenningen. Utladningene vil også ha en amplitudeverdi, som sier hvor stor selve utladningen er. En tredje verdi er polaritet, som sier om utladningen er positiv eller negativ.

Kombinasjonen av disse tre verdiene utgjør et PRPDA-plot¹, som viser utladninger over flere perioder plottet i én sinusperiode. Det er da mulig å se ved hvilke faseintervaller det oppstår utladninger. Selv om et slikt plot i utgangspunktet kun er todimensjonal, går det an å legge til en tredje dimensjon. Ved å bruke fargekode til å indikere intensitet, indikeres det også i hvilke områder utladningene oppstår mest hyppig. Et eksempel vises i Figur 2.9.



Figur 2.9: Eksempel på PRPDA-plot. De to gule områdene, rett før de to spenningstoppene, viser at det er i dette området de fleste utladningene oppstår. Et tydelig støybånd registreres opp til ca. 8 pC. Ved hjelp av PRPDA-plot kan uønsket støy dermed filtreres bort.

En fordel med PRPDA-plot er at forskjellige utladningstyper kan gjenkjennes. Koronautladninger, for eksempel, oppstår ved spenningstoppene til sinuskurven, og er lett å kjenne igjen dersom et slikt plot brukes. Hulromsutladninger forventes å skjer i faseområdene hvor stigningen til spenningskurven er brattest. Dette er igjen lett å observere i et PRPDA-plot.

Det går også an å kjenne igjen bakgrunnsstøy ved å bruke PRPDA-plot. Dersom

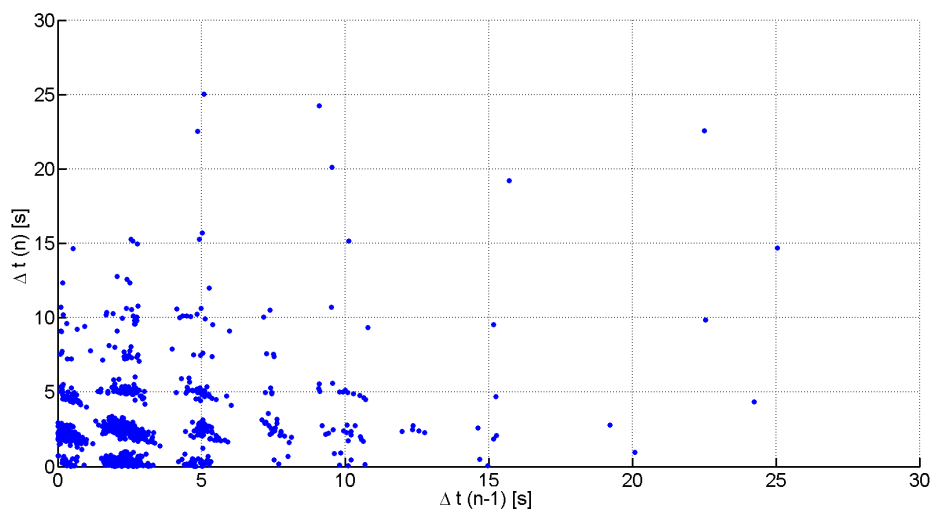
¹PRPDA står for Phase Resolved Partial Discharge Analysis

det tilsynelatene oppstår utladninger ved alle faseverdier, og ved en bestemt amplitude, kan dette bli tolket som støy. Under PD-målinger er det ønskelig å filtrere ut alt av støy, noe som er lett å gjøre dersom PRPDA-plot brukes. I Figur 2.9 registreres det et støybånd som består av ”utladninger” opp til ca. 8 pC. Ved å gjøre justeringer, enten under måling, eller i ettertid, kan dette støybåndet fjernes.

Ulempen med PRPDA-plot, er at tidspunktet for utladningene går tapt. Tiden mellom to utladninger, som kommer etter hverandre, går ikke an å lese ut ifra et PRPDA-plot. Det kan for eksempel gå flere perioder mellom to utladninger, uten at det gir noe utslag på fremstillingen av målingene.

2.4.2 Pulssekvensanalyse

I tillegg til å bruke faseoppløst PD-plot (PRPDA), går det an å se på hvordan sekvenser av utladninger oppfører seg. Pulssekvensanalysen (PSA) tar for seg tidspunktene til enkeltutladninger, i tillegg til den påtrykte spenningsverdien. Ved å se på tiden mellom to utladninger, i tillegg til spenningsforskjellen, plottes verdiene som vist i Figur 2.10 og 2.12.[16, s.1]



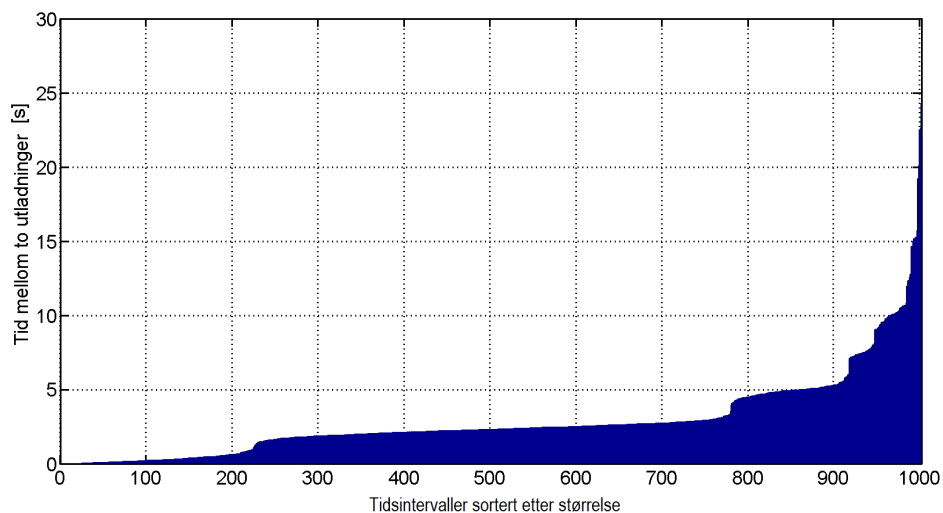
Figur 2.10: PSA-plot, som viser tidsforskjellen mellom to utladninger, for en hel målesekvens, ved 0.2 Hz. X-aksen viser tidsforskjellen mellom den aktuelle og den foregående utladningen, mens Y-aksen viser tidsforskjellen mellom den neste og den aktuelle utladningen.

For hvert punkt i Figur 2.10 blir det tatt utgangspunkt i en enkeltutladning. Plaseringen på x-aksen bestemmes av tidsforskjellen, i sekunder, mellom den aktuelle

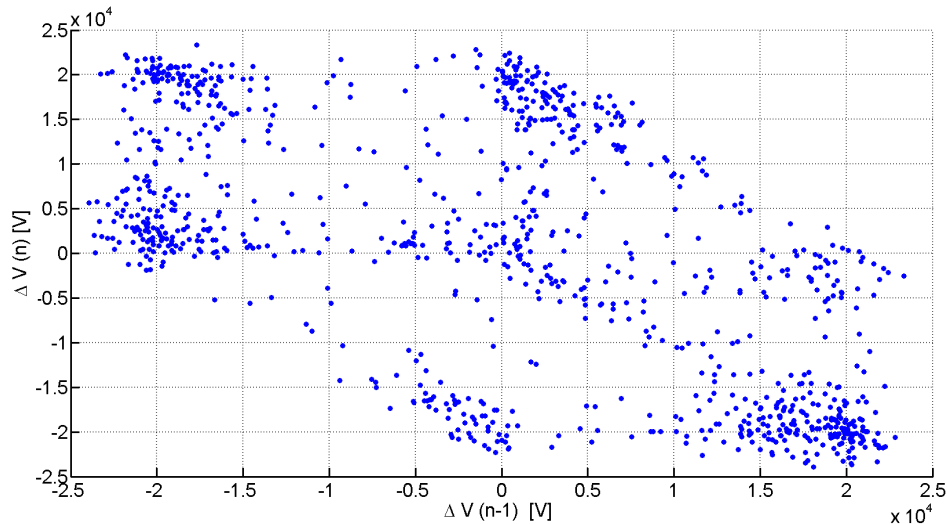
og den forrige utladningen. Vertikal plassering bestemmes av tidspunktet mellom den neste utladningen, og utladningen det blir tatt utgangspunkt i.

I rektangelet nederst til venstre i, Figur 2.10, er det flere områder med høy konsentrasjon av punkter. I området rundt koordinatene (2,5, 2,5) er ett av disse områdene. I dette tilfellet betyr det at det flere ganger har vært tre utladninger etter hverandre, med ca. 2,5 sekunder mellom seg. Siden frekvensen er 0,2 Hz, tilsvarer dette én utladning per periode. Tidsintervaller, sortert etter størrelse, mellom alle utladningene, vises i Figur 2.11. Det er her tydelig at det oftest går ca. 2,5 sekunder mellom utladningene.

Noe som blir veldig synlig i et PSA-plot, hvor tidsdifferansen vises, er perioder hvor det ikke oppstår utladninger. Tilfellet i Figur 2.10 har en utladning som oppstår 25 sekunder etter den forrige utladningen, og som etterfølges av en ny utladning 15 sekunder senere. Dette betyr at det har vært tre utladninger innenfor åtte spenningsperioder, siden frekvensen er 0,2 Hz.



Figur 2.11: Tid mellom utladninger ifra målesekvens gjort ved 0,2 Hz. Her vises resultater fra samme måling som i Figur 2.10. Hvert heltall langs x-aksen tilsvarer et tidsintervall mellom to utladninger. De forskjellige tidsintervallene kan leses av på y-aksen. Tidsintervallene er sortert etter størrelsen.



Figur 2.12: PSA-plot, som viser spenningsendringen som må til fra en utladning oppstår, til neste finner sted. X-aksen viser spenningsdifferansen mellom den aktuelle og den foregående utladningen, mens y-aksen viser spenningsdifferansen mellom den neste og den aktuelle utladningen. I dette tilfellet er den påtrykte spenningen $9 kV_{rms}$ ($\approx 25,5 kV_{pp}$), med en frekvens på 0,2 Hz.

I Figur 2.12 brukes samme metode som i Figur 2.10, for å plassere hver enkelt utladning i det todimensjonale koordinatsystemet. Forskjellen er at det her er spenningsforskjellen som plottes.[16, s.4]

En ulempe med denne type plot, er at perioder uten utladninger ikke synliggjøres, ettersom den største mulige differansen vil være topp-til-topp-verdien av spenningen. Men det går likevel an å se den generelle tendensen i utladningsaktiviteten. Store spenningsforskjeller betyr at to utladninger skjer i hver sin halvperiode, mens små spenningsforskjeller betyr at det oppstår flere utladninger i samme halvperiode.

2.4.3 Weibull-analyse

Weibull-diagram kan brukes til å plote utladningsdata, for å gjenkjenne forskjellige defekter i isolasjonsmateriale. Fordelen med denne metoden, er muligheten til å skille mellom flere forskjellige defekter, hvor det oppstår utladninger samtidig. Det går for eksempel an å skille mellom hulromsutladninger og overflateutladninger, som opptrer samtidig, ved å bruke Weibulldiagram.[17]

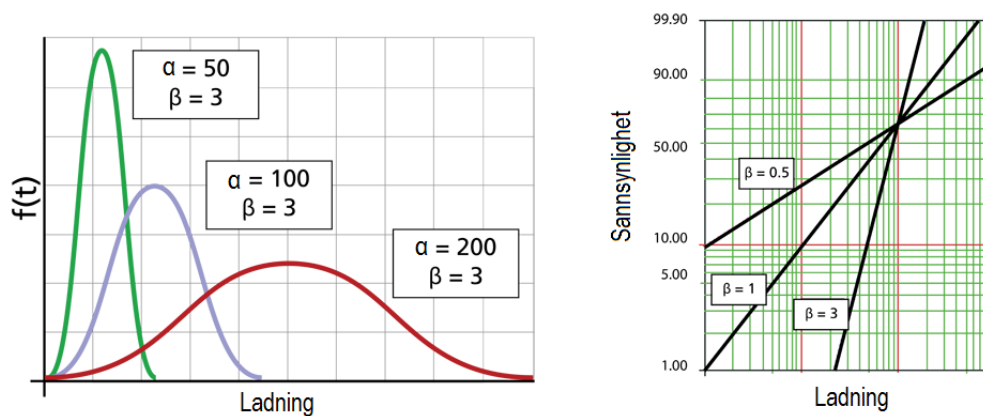
For å karakterisere de forskjellige tilfellene, finnes det to Weibull-funksjoner som

kan brukes. Dersom det kun er én kilde til utladninger, kan denne karakteriseres ved hjelp av en to-parameters Weibull-funksjon [18] :

$$F(q) = 1 - \exp\left(-\frac{q}{\alpha}\right)^\beta \quad (2.24)$$

hvor q er utladningsstørrelsene, α er skala-parameteren, og β er formfaktoren til funksjonen.

β -verdien til en fordeling beskriver stigningen i den kumulative fordelingen. Høy β -verdi tilsvarer stor stigning. α -verdien sier noe om spredningen til verdiene i fordelingen. Figur 2.13 viser hvordan α endrer seg når β er konstant, og motsatt.



(a) Endring av α -verdi, når β er konstant. (b) Endring av β -verdi, når α er konstant.

Figur 2.13: Endring av α - og β -verdi

Parameterne α og β kan estimeres ved hjelp av maksimal sannsynlighet, eller minste kvadraters metode. [18]

I tillegg kan fordelingen testes, ved hjelp av Cramer-von-Mises-testen, som gir en indikator på hvor godt den passer den gitte funksjonen.[18]

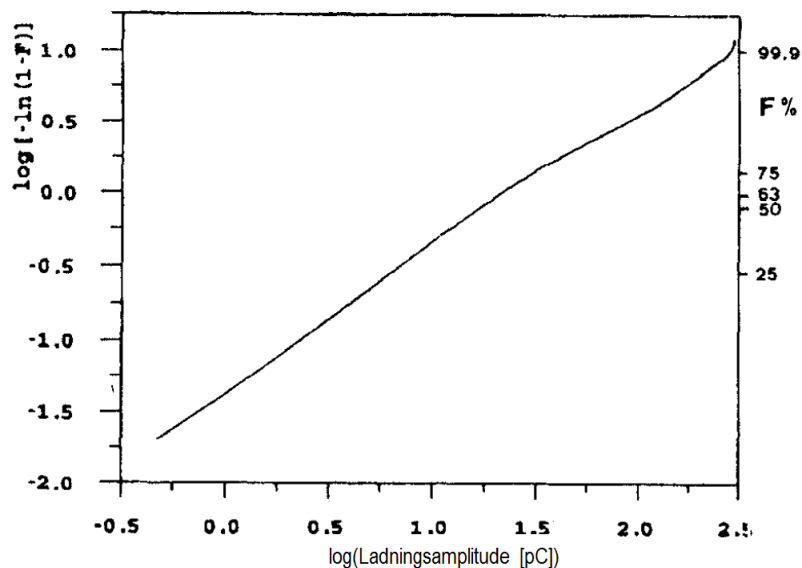
Dersom det er to kilder til utladninger, brukes en fem-parameters Weibull-funksjon [18] :

$$F(q) = pF_1(q) + (1 - p)F_2(q) \quad (2.25)$$

hvor F_1 og F_2 er hentet fra Ligning 2.24, og p er sannsynligheten til F_1

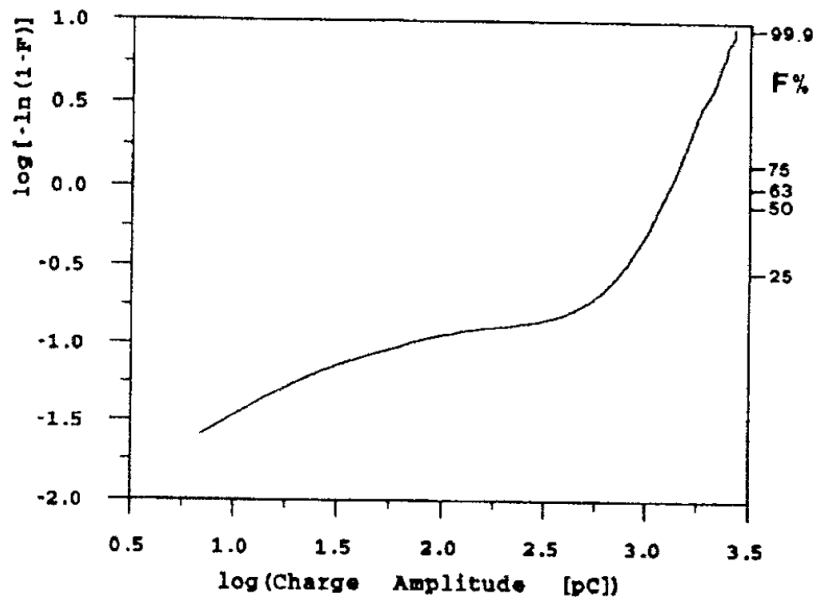
Ved å plote ladningsverdiene i et kumulativt sannsynlighetsplot (Weibull-graf), kan det observeres om det kun er én kilde til utladninger, eller om det er flere.

Dersom fordelingen er en rett linje, som i Figur 2.14, er det sannsynligvis kun én utladningskilde. Dette betyr at Ligning 2.24 brukes for å karakterisere fordelingen.



Figur 2.14: Kumulativ sannsynlighetsfordeling, ved kun én utladningskilde. [18]

Dersom fordelingen har en tydelig endring i stigning, som vist i Figur 2.15, kan det bety at det er to utladningskilder til stede. I så fall brukes Ligning 2.25 for å karakterisere fordelingen.



Figur 2.15: Kumulativ sannsynlighetsfordeling, ved to forskjellige utladningskilder. [18]

Dersom det er flere forskjellige utladningskilder, kan det være interessant å separere dem, slik at de kan plottes hver for seg. Dette kan enten gjøres grafisk eller analytisk.

Ved å gjøre dette kan de forskjellige fordelingene karakteriseres ved hver sin α - og β -verdi.

I denne oppgaven vil det fokuseres på en grafisk separering av utladningsdata. [19] Dette beskrives nærmere i Kapittel 4.5.1.

3 Metode

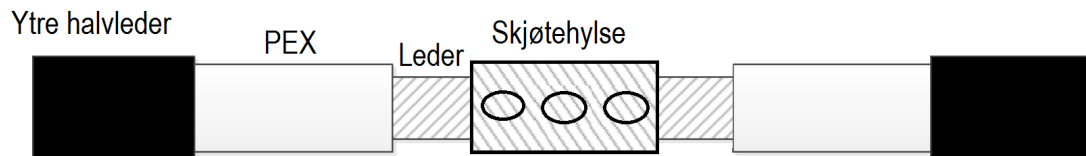
3.1 Beskrivelse av Testobjektene

Testobjektene som det måles på i denne oppgaven er tre mellomspennings kabelskjøter, som alle hører til samme trefase. De leveres innpakket i en beskyttende kappe og jordskjerm. Denne fjernes, før hver enkelt fase tas ut og måles på hver for seg.

Kabelen på den ene siden av skjøten har en stripbar halvleder, og en diameter på 29 mm, inkludert halvleder. Halvlederen på den andre kabeldelen er ikke stripbar, og diameteren på kabelen er 27 mm, inkludert halvleder.



Figur 3.1: Oppbygning av testobjektene i denne oppgaven. Stripbar halvleder og 29 mm kabeldiameter på høyresiden. Ikke stripbar halvleder og 27 mm diameter på venstresiden. Testobjektet består av: 1: Kabelskjøt, 2: Terminering, 3: Kabel, 4: Kabel med ytre halvleder fjernet, 5: Guard. [20, s.17]



Figur 3.2: Oppbygning av skjøten i testobjektene. Delene i denne figuren befinner seg inni skjøtdelen i Figur 3.1, og er omsluttet av en skjøte kropp som er laget av silikongummimateriale.

Skjøtene er av typen 3M kaldkrymp, og er montert på 12 kV PEX-kabler. De tre testobjektene omtales som Kabelskjøt A, B og C.

3.2 Preparering av testobjektene

3.2.1 Terminering

Når en kabel skal kobles til andre komponenter i systemet, må den ledende delen eksponeres. I slike tilfeller er det viktig at dette endepunktet er laget slik at det kan tåle de påkjenningene det utsettes for. I denne oppgaven er det spesielt viktig å unngå partielle utladninger i kabeltermineringene. Dette er fordi det skal måles på eventuelle utladninger i kabelskjøten, og om det oppstår utladninger i termineringene, vil det være vanskelig å skille mellom disse to tilfellene.

For å lage termineringer til testobjektene i denne oppgaven, følges en bestemt oppskrift. Denne finnes i Vedlegg B

3.2.2 Guard

Ved måling av dielektrisk respons er det kun ønskelig å måle hva som skjer i selve skjøten. For å isolere skjøten fra resten av testobjektet må det derfor lages et skille. Dette skillet gjør at målingene som blir gjort, ved dielektrisk respons, ikke inkluderer kabeldelen og termineringene. Guarden vil hindre krepstrømmer fra kabeldelen, slik at målingene gjøres kun i selve skjøten.

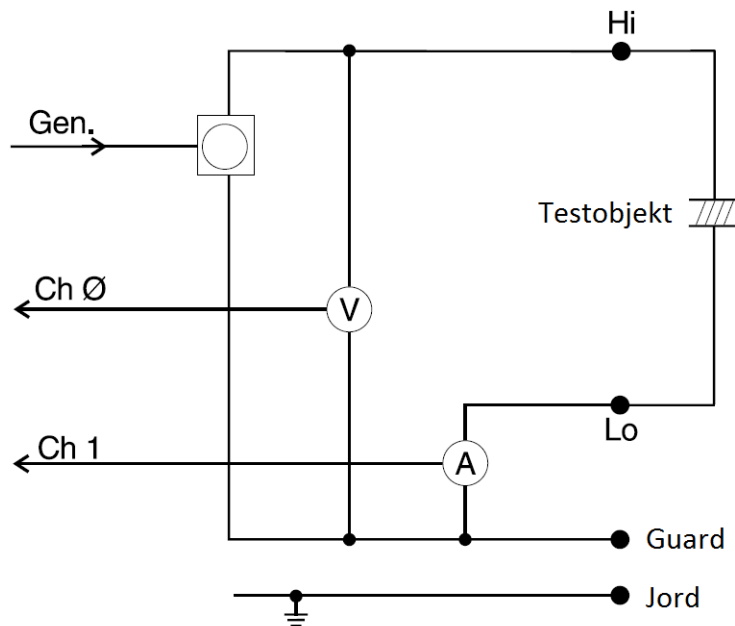
Metoden som brukes for å lage en slik guard finnes i Vedlegg B

3.3 Måling av Dielektrisk Respons

For å måle den dielektriske responsen til isolasjonsmaterialet brukes isolasjonsdiagnoseringsystemet IDA 200. I tillegg brukes IDA HVU (High Voltage Unit), som kan levere spenning opp til 30 kV peak ($21,2 kV_{rms}$) i frekvensområdet 10^{-4} - 100 Hz.

Metoden systemet IDA 200 benytter er dielektrisk spektroskopi, som måler de dielektriske egenskapene som funksjon av spenning og frekvens. Resultatene kan da gi svar på hvilke tapsmekanismer som eventuelt er til stede i testobjektet.

Spenningen som påtrykkes er sinusformet (Gen. Figur 3.3). Spenningen over prøveobjektet måles for de forskjellige påtrykte spenningene, ved de forskjellige frekvensene. Dette gjøres med et voltmeter (V), som vist i Figur 3.3. Samtidig måles lekkstrømmen i isolasjonsmaterialet ved hjelp av et elektrometer (A, Figur 3.3).



Figur 3.3: Impedansmålingsoppsett, IDA 200 [21]

Strømmålingene konverteres til spennings signaler, før begge målingene, som måles analogt, konverteres til digitale signaler. Disse digitale signalene legger grunnlaget for beregningene i systemet, som i dette tilfellet er impedans.

Måten testobjektet modelleres på kan velges ut ifra hva som er ønskelig. De mulige variantene er:

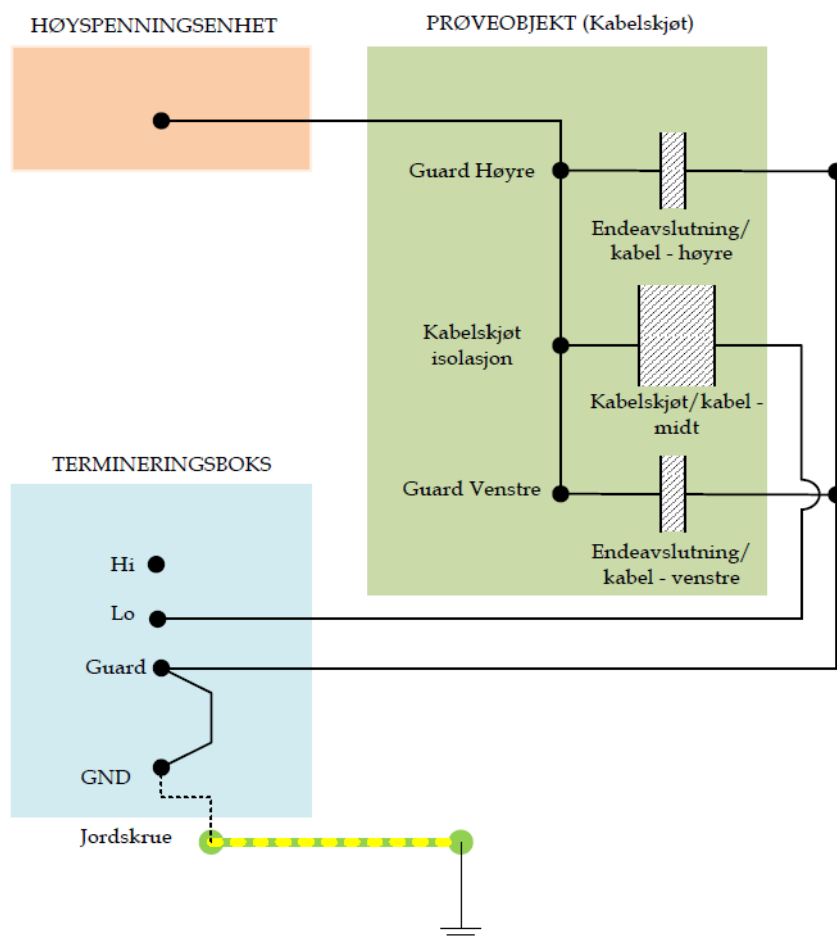
1. RC- serie-/parallellmodell (R, C)
2. Dielektrisk modell ($\epsilon', \Delta\epsilon', \epsilon'', \tan\delta$)
3. Resistiv modell (ϵ, ρ, σ)
4. Kompleks kapasitansmodell ($C', C'', \Delta C'$)

I dette tilfellet vil kompleks kapasitansmodell benyttes. Dette er både fordi modellen er uavhengig av testobjektets geometri, i tillegg til at den tar høyde for endring i dielektriske egenskaper. Med dielektrisk modell derimot, kreves den nøyaktige geometrien til testobjektet for å kunne tolke de målte verdiene.

Den målte reelle kapasitansen (C') tilsvarer den reelle permittiviteten (ϵ'), mens

den imaginære kapasitansen (C'') tilsvarer den imaginære permittiviteten (ε'')

Målingene for dielektrisk respons, som gjøres i dette prosjektet, utføres etter måleoppsettet UST (Ungrounded Specimen Test) med guard, vist i Figur 3.4



Figur 3.4: Måleoppsett for dielektrisk måling, "Ungrounded Specimen Test" (UST), IDA 200 [22, s.33]

Måleinstrumentet som benyttes består av to ledninger som er koblet til termineringsboksen (Figur 3.4). I andre enden av disse to ledningene er det koblet på to klyper. Den ene ledningen går til "Lo" på termineringsboksen, mens den andre går til "Guard". "Guard" er koblet til jord.

De to termineringene til testobjektet kobles sammen med en forfinnet kobbertråd. Det er her viktig at tråden ikke er borti selve skjøten, slik at termineringssiden

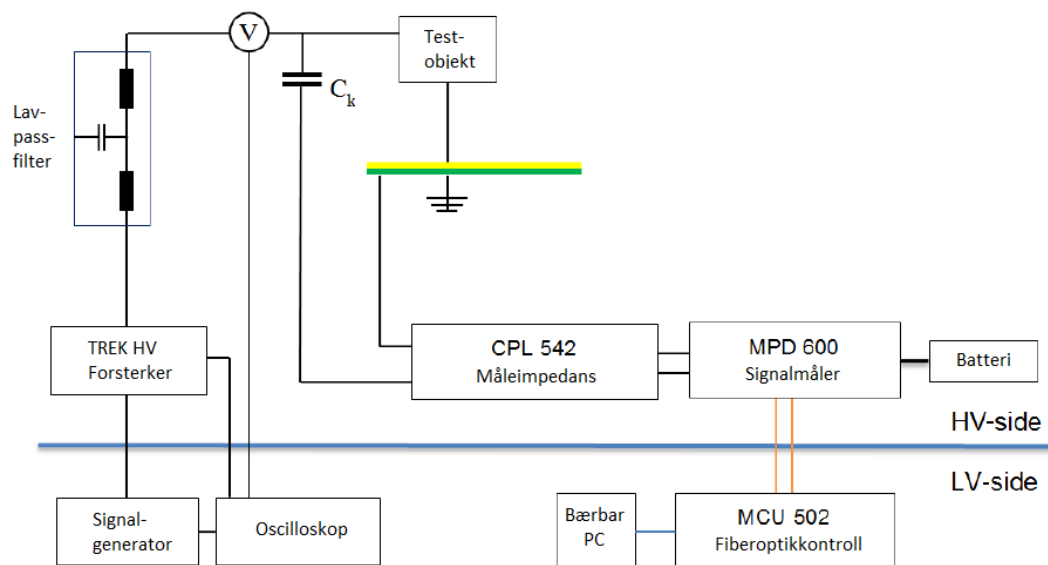
av kabelen fremdeles er isolert fra skjøten. Klypen som er koblet til "Guard" i termineringsboksen festes i denne kobbertråden.

En annen kobbertråd er festet på begge sidene av skjøten, slik at den er på innsiden av guarden på begge sider. Klypen som er koblet til "Lo" i termineringsboksen kobles til denne kobbertråden.

3.4 PD-måling

For å måle PD i dette prosjektet blir måleutstyr fra Omicron brukt [23]. Det blir også brukt en signalgenerator, hvor spenning og frekvens kan justeres. Mellom signalgeneratoren og testobjektet er det og benyttet en høyspenningsforsterker (TREK).

Ønskede frekvenser for spenningen inn på prøveobjektet er i området 0,1 til 100 Hz. For å filtrere ut signaler med frekvenser som ligger utenfor dette området benyttes et lavpassfilter, som vist i Figur 3.5 [24, s.13-14].



Figur 3.5: Oppsett for måling av PD [25]

Signalmåleren MPD 600 brukes for å detektere utladningene. Disse blir målt ved hjelp av en måleimpedans (CPL 542). Måleverdiene sendes fra MPD 600, via fiberoptisk kabel, til en mediakonverter (MCU 502). Mediakonverteren sender så verdiene videre, via USB, til en bærbar datamaskin.

Hver enkelt utladning plottes i et PRPDA-plot. Dette er en type plot som viser hvor på fasen de enkelte utladningene oppstår. I tillegg vises hyppigheten, i form av farge, og størrelsen på selve utladningene. Utladningsverdiene hentes senere inn i Matlab, hvor kun plassering på fasen, og størrelsen er synlig.

Signalmåleren (MPD 600) kan spenning-forsynes både via nettspenning og batteri. Dersom den forsynes fra nettet, via 230 V-uttak, vil det kunne registreres støy inn på måleren. Med batteriforsyning unngås dette problemet, og denne metoden er derfor å foretrekke.

For å kalibrere måleutstyret, brukes en kalibrator (CAL 542) [23, s.39]. Denne brukes til å sende en kjent ladning inn på testobjektet, som gir utslag på måleutstyret. Forholdet mellom den registrerte og faktiske ladningen brukes da som en faktor for å finne de faktiske utladningene som oppstår under målingene. Denne faktoren justeres i Omicron-softwaren som brukes.

3.4.1 Faseforskyvning

På grunn av de kapasitive egenskapene til kretsen, vil det, ved enkelte frekvenser, kunne oppstå faseforskyvninger under måling av PD. Måten dette justeres på, er å feste en kobbertråd i den åpne enden av kabelen, for så å påføre spenning. Ved tilstrekkelig påført spenning vil det da oppstå korona rundt denne tråden, som registreres av måleutstyret. Korona forventes å oppstå ved spenningstoppene, og dersom den målte koronaen, ved den aktuelle frekvensen, er forskjøvet i forhold til spenningstoppen, kan denne vinkelen også brukes til å fasekompensere ved PD-målingene.

Dette kompenseres det for når måledataene skal behandles i Omicron og Matlab.

3.5 Målingsrekkefølge

Målingene som utføres på de tre testobjektene er:

1. Dielektrisk responsmåling
2. PD-målinger
 - 2.1: Tennspenning
 - 2.2: 600 perioder
 - 2.3: Testing av termineringer
3. Måling av Isolasjonsresistivitet (megging)
4. Gjennomslagstest

5. Disseksjon

i oppgitt rekkefølge

3.5.1 Dielektrisk respons

Spenningsnivåene som påtrykkes, ved måling av dielektrisk respons er:

1 - 1,5 - 3 - 4,5 - 6 - 9 - 12 - 9 - 6 - 3 [kV_{rms}]

Alle disse spenningene blir påtrykt ved følgende frekvenser:

0,1 - 0,2 - 0,5 - 1 - 2 - 5 - 10 - 20 - 50,2 - 100 [Hz]

Grunnen til at det måles ved 50,2 Hz og ikke ved 50 Hz, er fordi målingene kan påvirkes av eksterne 50 Hz-kilder. Dette gjelder spesielt for de lavere spenningsverdiene. Målinger ved 50,2 Hz påvirkes ikke på samme måte.

Høyeste påtrykte spenning er 12 kV_{rms} . Dette er for å få et godt sammenligningsgrunnlag med PD-målingene, som ikke måles ved høyere spenning enn dette ($2 \cdot U_0$). For å se om det oppstår noen endring i testobjektet under testing, måles noen av de lavere spenningene på nytt, etter toppverdien, bare i reversert rekkefølge.

Frekvensene det måles ved, er de samme som for PD-målingene.

Etter at målingen av dielektrisk respons er gjennomført, fjernes begge guardene til testobjektene. Når dette er gjort, skal det eneste som er igjen av guarden være hakket i halvlederen. Dette hakket dekkes med halvledende lakk, før PD-målingene gjennomføres.

3.5.2 Partielle utladninger

Kalibrering

Det første som gjøres før PD-målingene gjennomføres, er å kalibrere testobjektet. Dette gjøres hver gang et nytt objekt skal testes.

Ladninger på 5, 10, 20, 50 og 100 pC sendes inn på testobjektet. Dersom den innsendte og målte ladningen ikke stemmer overens, justeres dette i Omicron.

1. PD-måling: Tenn- og slukkespenning

Etter kalibreringen utføres en tenn-/slukkespenningstest. Dette gjøres ved å først påtrykke 1 kV, ved den aktuelle frekvensen. Etter fire minutter økes spenningen med 0,5 kV. Dette gjøres helt til det observeres utladninger, eller påtrykt spenning er 12 kV ($2 \cdot U_0$). Når det oppstår utladninger i testobjektet er tennspenning oppnådd. Spenningen reduseres så med samme steg, og samme tidsintervall, helt til det ikke lenger kan registreres PD. Slukkespenning er da oppnådd.

Denne prosedyren utføres ved de samme frekvensene som den dielektriske responsmålingen. Dette betyr at det også her måles ved 50,2 Hz, og ikke 50 Hz som er vanlig frekvens under drift.

En av fordelene med å gjøre målinger ved forskjellige frekvenser, er at den lokale tilstanden, i en eventuell defekt, vil endre seg ved varierende frekvens. Det lokale elektriske feltet er en av egenskapene som kan endre seg forskjellige frekvenser, som igjen påvirker PD-aktiviteten.[13, s.1]

Grunnen til at disse frekvensene og denne rekkefølgen er valg, er for å kunne sammenligne med tidligere oppgaver.[20] [26]

Ved økende påtrykt spenning, økes også støymengden fra forsterkeren. Dette justeres i Omicron, slik at kun øverste delen av støybåndet kommer med på målingene. Dette er for å unngå unødvendig store filer under innspillingen. Samtidig er det ønskelig å få med alt av målepunkter som ikke er støy. Dersom støygrensen settes for høyt, vil interessante målepunkter kunne gå tapt.

Måleutstyret som brukes for å finne tennspenning, viser resultatene i et PRPDA-plot, som viser utladningsstørrelse, -polaritet og -faseverdi. Begrensningen med dette utstyret, er blant annet at måleverdiene ikke kan eksporteres til Matlab, for videre analyse av resultatene.

2. PD-måling: 600 perioder ved tennspenning

For å kunne sammenligne karakteristikken til testobjektene, ved de forskjellige frekvensene, velges det å gjøre en ny PD-måling, som tar for seg 600 tilfeldige perioder² for noen av frekvensene. Disse målingene tar for seg de to høyeste og de to laveste frekvensene, som det måles ved under tennspenningstesten. Grunnen til dette er først og fremst fordi det er mest interessant å se hva som skjer ved 50 Hz (50,2 Hz i dette tilfellet) i forhold til hva som skjer ved 0,1 Hz. I tillegg viser det seg,

²Antall målte perioder er valgt til 600 for å kunne sammenligne med en tidligere oppgave [20].

ut ifra tennspenningsmålingene, at tennspenningen er relativt frekvensuavhengig for de åtte høyeste frekvensene, før den reduseres litt ved 0,2 Hz.

Ved å bytte ut deler av måleutstyret som brukes under tennspenningstesten, blir det mulig å eksportere måleverdiene til Matlab, slik at resultatene kan analyseres ytterligere.

Ved 0,1 og 0,2 Hz måles det i nøyaktig 600 perioder, mens det ved 50,2 og 100 Hz måles i fem minutter. 600 tilfeldige perioder hentes deretter ut, ved hjelp av Matlab, for å kunne sammenligne målingene for de fire frekvensene.

Tabell 3.1: Målinger utført ved tennspenning for å sammenligne 600 tilfeldige perioder ved fire forskjellige frekvenser

Frekvens [Hz]	Antall perioder målt	Tid målt [min]
0,1	600	100
0,2	600	50
50,2	15060	5
100	30000	5

Selv om tennspenning allerede har blitt funnet, utføres de nye målingene først på et spenningsnivå som ligger 1 kV under den målte tennspenningen. Dette er fordi utladninger er stokastiske verdier, som ikke nødvendigvis alltid oppstår, selv om forholdene er de samme som ved tidligere målinger. Det kan derfor forventes at det oppstår utladninger ved et lavere spenningsnivå enn tidligere målt. Dersom det ikke oppstår utladninger ved den første målte spenningsverdien, økes spenningen med 0,5 kV. Denne metoden følges, helt til det igjen oppstår tenning i testobjektene. Spenningen økes ikke over 12 kV ($2 \cdot U_0$), som ved den første PD-testen.

Støy som kommer med på målingene filtreres ut i ettertid, enten ved hjelp av Omicron eller Matlab. Dette er spesielt viktig i denne delen, siden alt av måleverdier skal analyseres.

I tillegg brukes det fasekompensering ved de to laveste frekvensene. Hvordan faseforskyvningen finnes, beskrives i Kapittel 3.4.1. De målte faseverdiene finnes i Tabell E.1 i Vedlegg E. Forskyvningen som brukes for målingene vises i Tabell E.3. Dette gjelder kun ved 0,1 og 0,2 Hz.

Testing av termineringer

For å være sikker på at de målte utladningene ikke oppstår i termineringene, utføres det tester på en referansekabel. Et stykke av kabelen til den ene fasen brukes til å gjøre målingene på. Det påtrykkes 6, 9, 12 og 15 kV ved de ti frekvensene som PD-målingene utføres ved. Eneste unntaket er 0,1 Hz, hvor det kun påtrykkes 6, 9 og 12 kV, på grunn av begrenset spenning ut ifra spenningsgeneratoren. Resultatene fra målingene vises i Vedlegg D

3.5.3 Isolasjonsresistivitet

Ved hjelp av en megger måles resistiviteten i isolasjonen. Meggeren påtrykker en likespenning over isolasjonen, og måler lekkstrømmen. Ut ifra dette gir den ut motstandsverdien til isolasjonen. Denne testen utføres både med 1 og 5 kV påtrykt spenning.

3.5.4 Gjennomslagstest

Når de ikke-destruktive målingene er gjort, gjennomføres to destruktive tester, for å en bedre oversikt over hvilken tilstand skjøtene er i. Den første av disse er gjennomslagstesten.

Når gjennomslagsstyrken til kabelskjøtene skal testes, kobles lederen til en høy-spenningskilde. Ytre halvleder jordes via kobbertråden som brukes under PD-målingene. For at gjennomslaget ikke skal oppstå i termineringene, brukes vann-termineringer i stedet for elastisk isolerende teip og feltstyrende duk.

For denne testen økes den påtrykte spenningen, helt til det oppstår gjennomslag. Spenningen økes med 5 kV hvert minutt, og starter på 5 kV.

3.5.5 Disseksjon

Etter gjennomslagstesten, dissekeres de tre testobjektene. Dette gjøres ved å lage et snitt langs hele skjøtekroppen, som gjør at den enkelt kan fjernes. Når dette har blitt gjort, ser skjøten ut som i Figur 3.2.

3.6 Analysering av Måleresultater

Når måleresultatene skal analyseres, er det viktig at alt av bakgrunnsstøy har blitt fjernet. Måten dette gjøres på beskrives i Vedlegg C.2.

3.6.1 Pulssekvensanalyse

For å se nærmere på utladningsaktiviteten, i form av utladningstidspunkt, og spenningsendring mellom to utladninger, foretas det en pulssekvensanalyse.

Resultatene som brukes i denne analysen, hentes fra målingene som gjøres i 600 perioder. For å få en bedre oversikt over aktiviteten, brukes hele målesekvensen fra målingene ved 50,2 og 100 Hz.

Antall målte perioder vises i Tabell 3.2.

Tabell 3.2: Antall perioder målt, ved de forskjellige frekvensene, for resultatene til pulssekvensanalysen.

Frekvens [Hz]	Antall perioder målt
0,1	600
0,2	600
50,2	≈ 15000
100	≈ 30000

Resultatene som eksporteres til Matlab, inneholder informasjon om hver enkelt utladning. Ladningsstørrelsen, polaritet, faseverdi og tidspunkt kan hentes ut og plottes. I pulssekvensanalysen brukes tidspunkt og faseverdi for å lage PSA-plot. Scriptene som brukes for å lage plottene finnes i Vedlegg A.3.

Spenningsendring

Ved å se på spenningsendringen mellom to utladninger, plottes resultatene, ved hver frekvens, i et todimensjonalt koordinatsystem.³ For hvert punkt tas det utgangspunkt i én enkelt utladning (q_i). Plassering langs x-aksen bestemmes av spenningsendringen mellom denne og den forrige utladning. Plassering langs y-aksen bestemmes av spenningsendringen mellom den neste utladningen og q_i . Et eksempel på dette vises i Figur 3.6. Dette er samme eksempel som i Kapittel 2.4.2.

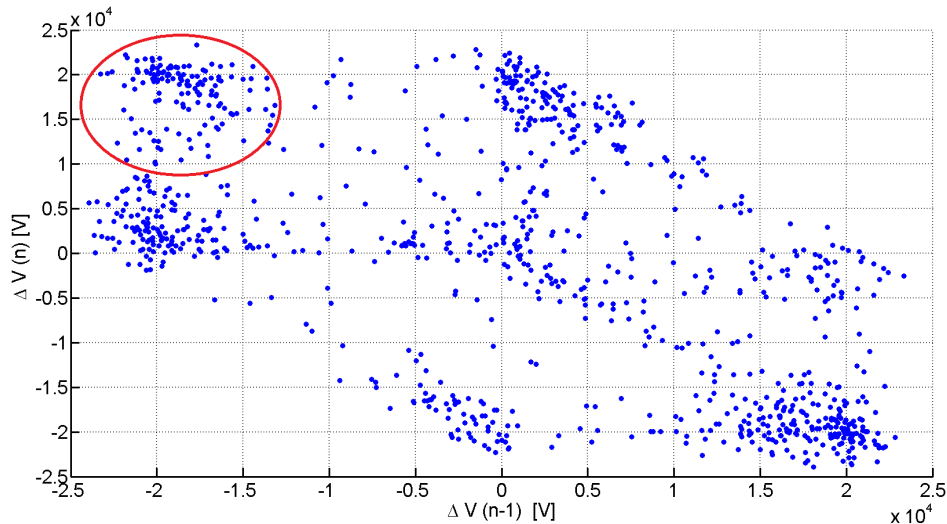
Siden spenningen oppgis som rms-verdi, multipliseres den med kvadratroten av to for å få amplitudeverdien. Den maksimale spenningsendringen vil derfor være:

$$\Delta V_{max} = 2 \times \sqrt{2} \times V_{rms} \quad (3.1)$$

For å skille mellom de plottede områdene, kan de karakteriseres ut ifra x- og y-verdiene. For å gjøre dette brukes størrelsen til absoluttverdien av akseverdien, som

³Med spenningsendring menes endringen av den påtrykte spenningen, mellom to utladninger.

enten defineres som høy eller lav. I tillegg brukes fortegn, for å skille områdene fra hverandre.

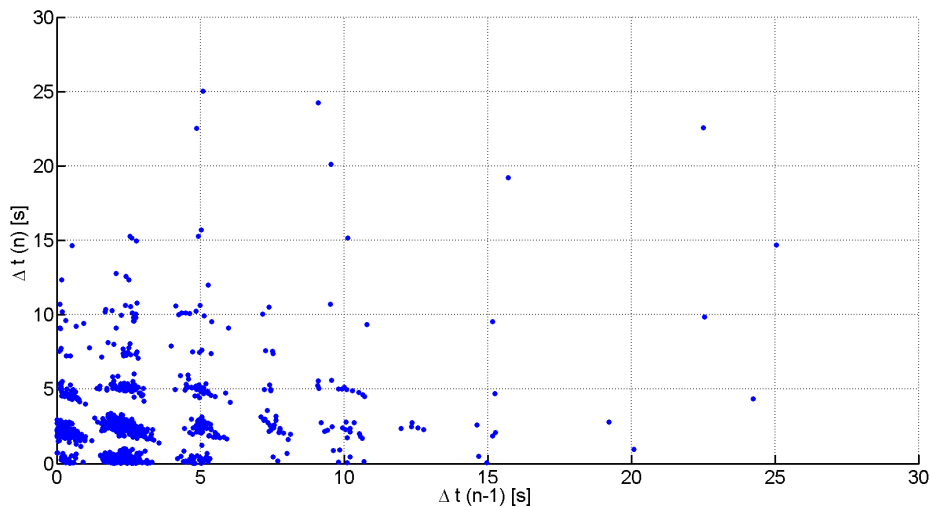


Figur 3.6: PSA-plot, som viser spenningsendringen som må til fra en utladning oppstår, til neste finner sted. Den påtrykte spenningen er i dette tilfellet $9 kV_{rms}$, som betyr at den største spenningsendringen, ifølge Ligning 3.1, er $\approx 25,5$ kV.

Ved å ta utgangspunkt i Figur 3.6, kan de plottede områdene karakteriseres. Samlingen av punkter, øverst til venstre, har høy negativ x-verdi og høy positiv y-verdi. Dette er et tilfelle hvor det har vært stor spenningsendring mellom tre utladninger, som igjen betyr at det oppstår få utladninger per periode. Alle de andre samlingene av punkter kan karakteriseres på samme måte, og gi en oversikt over utladningsaktiviteten i det aktuelle tilfellet.

Tidsdifferanse

Ved å se på tidsforskjellen mellom utladninger, i stedet for spenningsendringen, plottes resultatene på samme måte. Det tas også her utgangspunkt i én utladning, hvor x-verdien er forskjellen mellom tidspunktet til denne og forrige utladning, og y-verdien er tidsforskjellen til neste utladning. Et eksempel på dette vises i Figur 3.7.



Figur 3.7: PSA-plot, som viser tidsforskjellen mellom utladninger. Spenningsfrekvensen er 0,2 Hz, som tilsvarer en periodetid på fem sekunder. Hvert punkt tilsvarer tidsdifferansen mellom tre utladninger. X-verdien til punktet sier hvor stor tidsdifferansen er mellom de to første utladningene, mens y-verdien sier hvor stor tidsdifferansen er mellom de to siste.

Den vanligste tidsforskjellen mellom to utladninger kan finnes ved hjelp at et slikt plot. I Figur 3.7 er det mange punkter som har ca. 2,5 som enten x- eller y-verdi. Dette betyr at denne tidsdifferansen er veldig vanlig i dette tilfellet. I tillegg er det noen punkter som har relativt høy x- eller y-verdi, som vil si at det også har vært lengre opphold uten utladninger.

3.6.2 Weibull-analyse

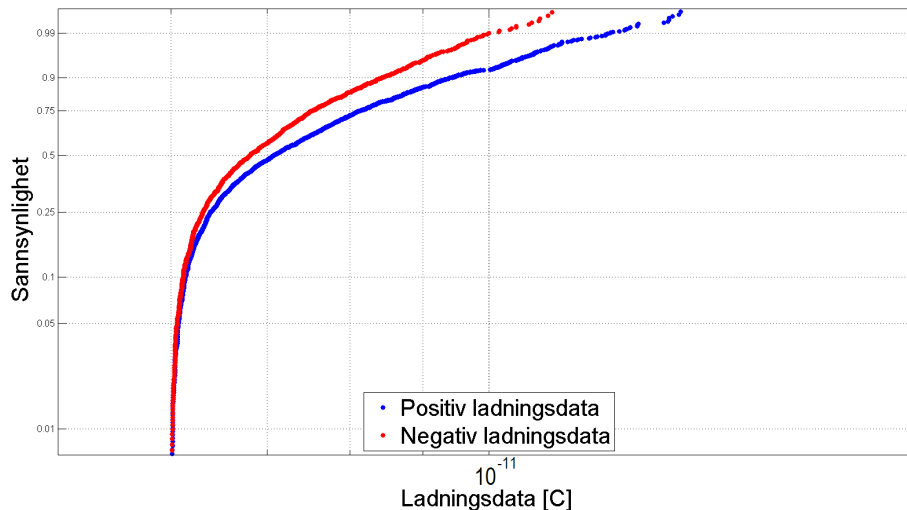
I Weibull-analysen, brukes også resultatene fra PD-målingen hvor det måles i 600 perioder. Ved 50,2 og 100 Hz brukes alt av måleresultater, som vil si at betydelig flere perioder brukes for disse to frekvensene.

Separering av fordelinger

I de tolv tilfellene det måles ved, plottes resultatene i Weibulldiagram, der positive og negative utladninger plottes hver for seg. Et eksempel på dette vises i Figur 3.8.

Fordelingen i Figur 3.8 har en kraftig stigning for de laveste ladningsverdiene, før den avtar ved rundt 0,25 på y-aksen.

Fra rundt 0,5, på y-aksen, stiger fordelingen jevnt opp mot de høyeste utladningene. Dette området har en helt annen stigning enn i begynnelsen, og både den positive og negative fordelingen kan derfor karakteriseres ved hjelp av to forskjellige stigninger (β -verdier).



Figur 3.8: Eksempel på Weibull-plot. Den kumulative fordelingen av utladningene vises for både positive og negative utladninger

Figur 3.9 viser to vertikale skillelinjer. Disse brukes for å separere utladningene, slik at to α - og β -verdier kan finnes, for å karakterisere de to fordelingene.

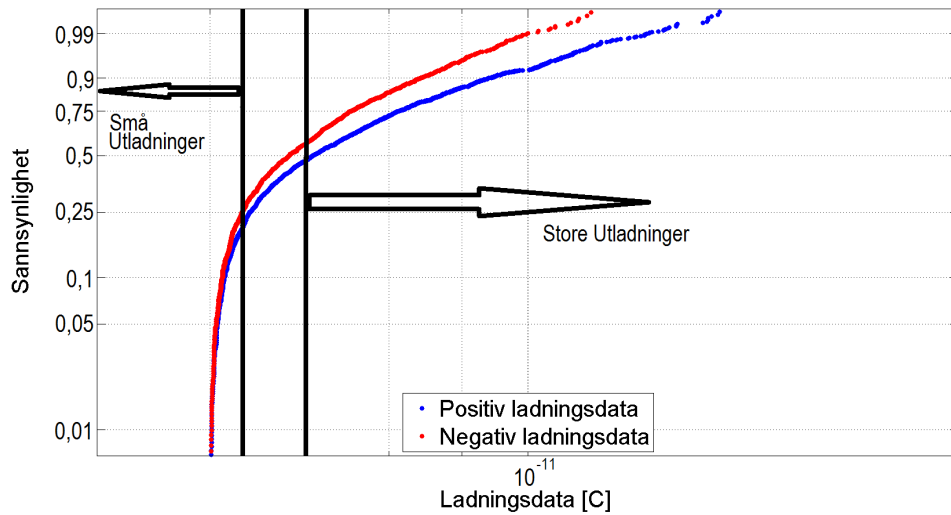
X-verdiene til de to skillelinjene bestemmer hvilke utladninger som hører til hvilken fordeling. Alle utladninger som har større verdi enn x-verdien til den høyre skillelinjen, hører til samme fordeling. Det samme gjelder for alle utladningene som har mindre ladningsverdi enn x-verdien til den venstre skillelinjen.

Grunnen til at det brukes to skillelinjer, er at det kan være vanskelig å definere nøyaktig hvor skillet mellom de to fordelingene går. Dette betyr at det vil være en del utladninger, imellom de to skillelinjene, som ikke blir tatt med i de to fordelingene. Dette fører til mer nøyaktige α - og β -verdier, ettersom det kun tas med verdier som, med stor sannsynlighet, hører til den aktuelle fordelingen.

Siden den positive og negative fordelingen deles i to, blir det fire α - og β -verdier som karakteriserer måleresultatene i hvert tilfelle.

I tilfeller hvor det er flere enn to fordelinger, brukes flere skillelinjer, for å separere

utladningene.



Figur 3.9: Eksempel på Weibull-plot, med positive og negative utladninger. Alle utladninger, som er mindre enn x-verdien til den venstre skillelinjen, hører til samme fordeling. I tillegg hører alle utladninger, som er større enn x-verdien til den høyre skillelinjen, til en egen fordeling. De to fordelingene har hver sin α - og β -verdi, som beregnes etter at fordelingen har blitt delt i to deler.

For å finne α - og β -verdiene, til de to fordelingene, brukes ”wblfit”-funksjonen i Matlab. Denne er beskrevet i Vedlegg A.2

4 Måleresultater og analyse

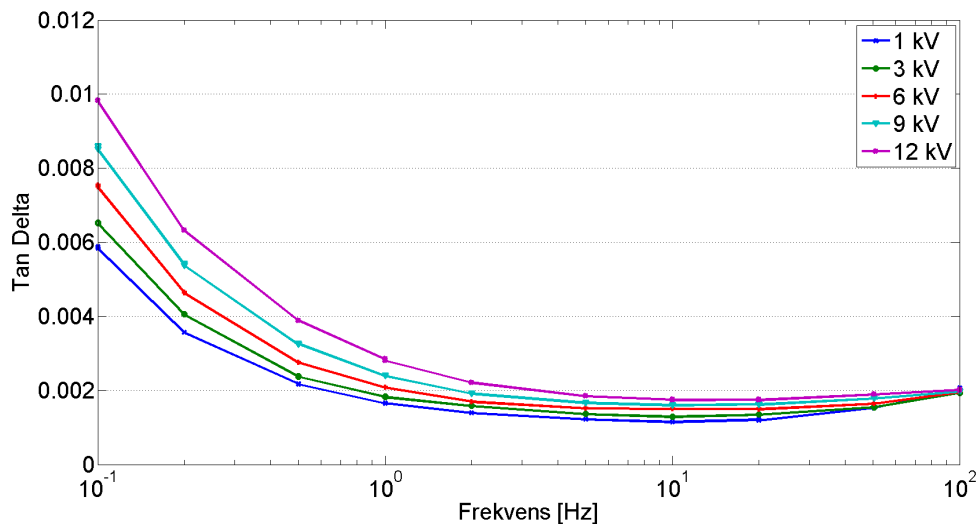
4.1 Dielektrisk responsmåling

I dette kapitlet plottes tapsfaktoren ($\tan(\delta)$) som funksjon av frekvens. Dette gjøres for fem forskjellige spenningverdier i de tre kabelskjøtene.

4.1.1 Kabelskjøt A

Tapsfaktoren til Kabelskjøt A har en verdi på rundt 0,002, ved frekvensene 1 - 100 Hz. Ved de lavere frekvensene økes tapsfaktoren betraktelig, og ved 12 kV påtrykt spenning er den nesten 0,1 når frekvensen er 0,1 Hz.

Forskjellen mellom tapsfaktoren ved de forskjellige spenningsverdiene er relativt liten i området mellom 1 og 100 Hz. Ved å redusere frekvensen, øker denne forskjellen, som er størst ved 0,1 Hz.



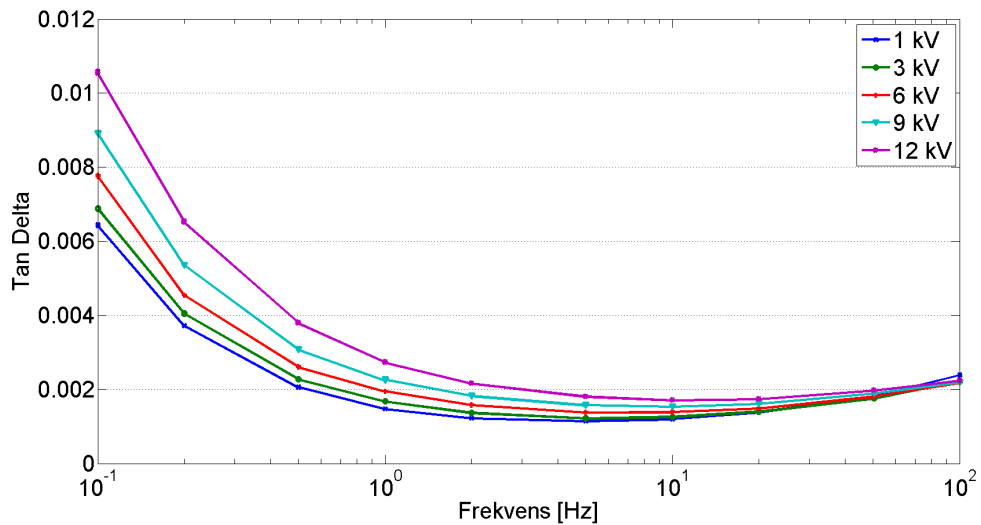
Figur 4.1: Dielektrisk responsmåling for Kabelskjøt A. Tapsfaktoren vises for 1-3-6-9-12 kV. Tapsfaktoren øker ved å øke spenningen. Høy tapsfaktor ved lave frekvenser skyldes dominerende resistiv strøm ved reduisering av frekvensen.

4.1.2 Kabelskjøt B

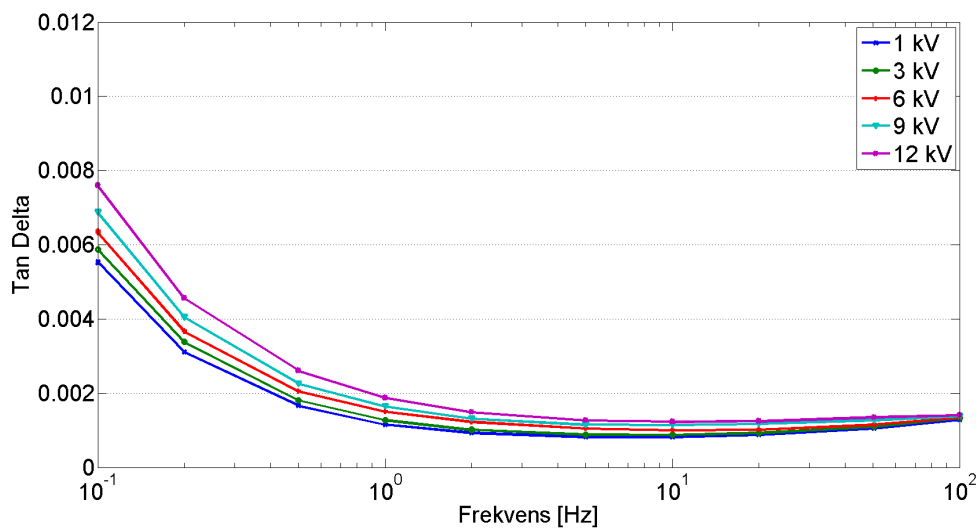
Også Kabelskjøt B har en økende tapsfaktor ved redusert frekvens. Resultatene er veldig like for Kabelskjøt A og B, som kan tyde på at tilstanden er relativt lik.

4.1.3 Kabelskjøt C

Kabelskjøt C har noe lavere tapsfaktor enn de to foregående testobjektene. Mellom 1 og 100 Hz har Kabelskjøt A og B en tapsfaktor på ca. 0,002, mens den i Kabelskjøt C måles til å være ca. 0,01, ved de samme frekvensene. Stigningen fra 1 til 0,1 Hz er også betydelig for Kabelskjøt C, men den er ikke høyere enn 0,008 for noen av spenningsverdiene. For Kabelskjøt A og B måles det en tapsfaktor over 0,08, både ved 9 og 12 kV.



Figur 4.2: Dielektrisk responsmåling for Kabelskjøt B. Tapsfaktoren vises for 1-3-6-9-12 kV. Tapsfaktoren øker ved å øke spenningen. Høy tapsfaktor ved lave frekvenser skyldes dominerende resistiv strøm ved redusering av frekvensen. Måleresultatene for Kabelskjøt A og B er veldig like.



Figur 4.3: Dielektrisk responsmåling for Kabelskjøt C. Tapsfaktoren vises for 1-3-6-9-12 kV. Tapsfaktoren øker ved å øke spenningen. Høy tapsfaktor ved lave frekvenser skyldes dominerende resistiv strøm ved redusering av frekvensen. Sammenlignet med de to første kabelskjøtene, er tapsfaktoren noe mindre for Kabelskjøt C.

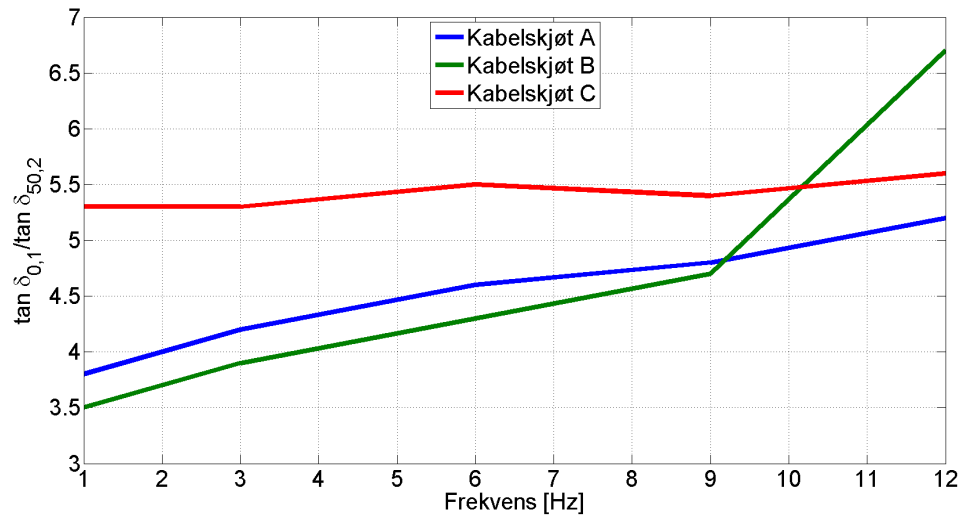
4.1.4 Forhold mellom 0,1 og 50,2 Hz

Forholdet mellom tapsfaktoren ved 0,1 Hz og 50,2 Hz vises i Figur 4.4.

For Kabelskjøt A og B stiger forholdet jevnt opp til 9 kV. Kabelskjøt A har omtrent lik stigning fra 9 til 12 kV og, mens forholdet i Kabelskjøt B øker veldig i det siste spenningssteget.

Kabelskjøt C har et jevnt forhold mellom de to tapsfaktorene, ved alle spenningsverdiene, og er hele tiden høyere enn de to andre, bortsett fra ved 12 kV.

Verdiene i Figur 4.4 vises i Tabell F.1.

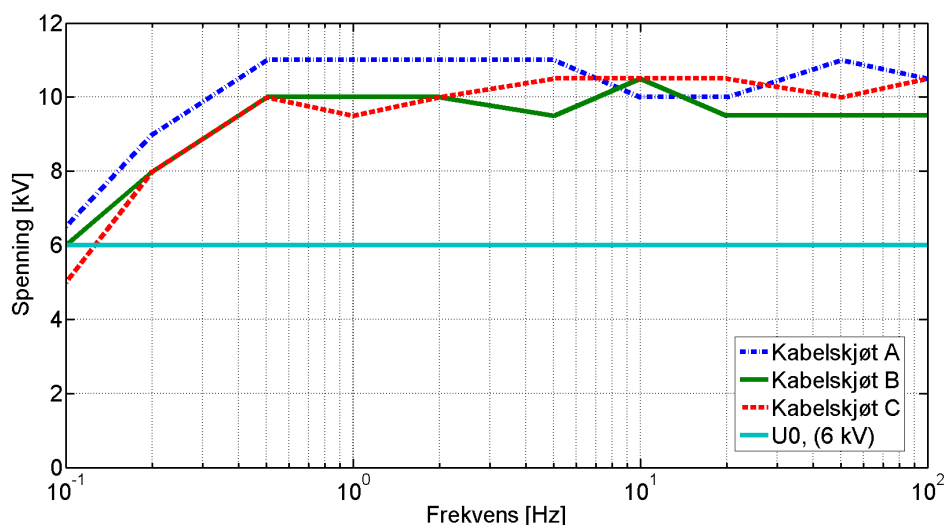


Figur 4.4: Forhold mellom $\tan(\delta)$ for målinger ved 0,1 og 50,2 Hz. Målingene er gjort ved 1, 3, 6, 9 og 12 kV.

4.2 Tennspenningstest, PD-måling nummer 1

I dette kapitlet er tennspenningen, for de tre testobjektene, plottet som funksjon av frekvens. Det er først og fremst interessant å se hva som skjer ved 50 Hz (50,2 Hz i dette tilfellet), sammenlignet med hva som skjer ved 0,1 Hz. Dette er fordi PD-tester som vanligvis benyttes, for slike kabelskjøter, utføres ved disse to frekvensene.

4.2.1 Frekvensavhengig tennspenning



Figur 4.5: Tennspenning for Kabelskjøt A, B og C. Figuren viser også tennspenning i forhold til U_0 . For de åtte høyeste frekvensene er tennspenningen mellom 9,5 og 11,0 kV, som er godt over U_0 . Ved 0,1 Hz ligger tennspenningen i området rundt U_0 .

Tennspenningen til alle tre testobjektene er relativt lik, i forhold til påtrykt spenningsfrekvens. Frekvensene mellom 0,5 og 100 Hz gir stabil høy tennspenning, som ligger litt under $2 \cdot U_0$. For alle tre kabelskjøtene ligger tennspenningen mellom 9,5 og 11 kV, innenfor det nevnte frekvensintervallet.

I alle tilfellene reduseres også tennspenningen når frekvensen er 0,2 Hz. Den ligger da i området 8 til 9 kV, som fremdeles er en del høyere enn U_0 .

Ved 0,1 Hz reduseres tennspenningen ytterligere, og ligger i området 5,5 til 6,5 kV, som er i samme område som vanlig spenningen under driftsforhold ($\approx 6,4$ kV) og U_0 .

Alle de nevnte målingene stemmer overens med resultatene funnet i [26, s.38] og [20, s.36].

Resultatene for hvert enkelt testobjekt finnes i Vedlegg C.1.1.

4.2.2 Definerings av tennspenning

Hva som defineres som tenning, ved de forskjellige frekvensene, kan være utfordrende å tolke. Siden hver måling gjøres i fire minutter, vil det ved 100 Hz måles i 24000 perioder, mens det ved 0,1 Hz kun måles i 24 perioder. Antall utladninger, målt ved de laveste frekvensene, vil derfor være betraktelig mindre enn ved for eksempel 100 Hz. Utladningsaktiviteten for de forskjellige tilfellene, i form av PRPDA-plot, vises i Vedlegg C.

Selv om det kan være vanskelig å tolke nøyaktig når tennspenningen oppstår, ved de lavere frekvensene, registreres det likevel tenning ved relativt lave spenningsverdier. Det antas derfor at de målte verdiene viser den korrekte tilstanden i forhold til tennspenning ved varierende frekvens.

I enkelte tilfeller, ved de høyeste frekvensene, registreres det noe som kan være utladninger på ett spenningsnivå, før det gjøres enda en økning i spenningen. Dette er igjen et tvilstilfelle, hvor det er vanskelig å vurdere om tennspenning er oppnådd, eller om det er noe annet som registreres av måleinstrumentet. I disse tilfellene ble det registrert utladninger ved neste spenningsøkning, så tennspenning kan ha vært oppnådd allerede i målingen før. Dette påvirker ikke tendensen i tennspenningstesten, og vurderes derfor ikke som noe annet enn et akseptabelt avvik.

En måte å få mer nøyaktige resultater på, ville vært ved å gjøre samme målingen flere ganger. Dette ville i så fall vært veldig tidkrevende, og ble derfor ikke gjort i denne oppgaven.

4.3 600 Perioder, PD-måling nummer 2

Dette kapitlet tar for seg målinger gjort ved 0,1, 0,2, 50,2 og 100 Hz. For disse målingene brukes 600 tilfeldige sammenhengende perioder, fra hver frekvens. Dette er for å kunne sammenligne hva som skjer ved de forskjellige frekvensene.

Utladningene, plottet i Omicron, finnes i Vedlegg C.2.

4.3.1 Sammenligning med tennspenningstesten

Målingene gjort i denne delen tar for seg hva som skjer ved tennspenning. Tennspenningen ble, i forrige kapittel, målt ved å gradvis øke den påtrykte spenningen. Dette blir også gjort i denne delen. Men i dette tilfellet starter målingen ved 1 kV lavere enn den tidligere målte tennspenningen. Spenningene hvor det registreres utladninger, for begge testene, vises i Tabell 4.1.

Tabell 4.1: Tennspenning målt under tennspenningstesten og for 600-periodetesten, henholdsvis 1. og 2. test.

Kabelskjøt	Testtype	0,1 Hz	0,2 Hz	50,2 Hz	100 Hz
A	1. Test:	6,5 kV	9,0 kV	11,0 kV	10,5 kV
	2. Test:	8,5 kV	9,0 kV	11,0 kV	10,5 kV
B	1. Test:	6,0 kV	8,0 kV	9,5 kV	9,5 kV
	2. Test:	5,5 kV	8,0 kV	9,0 kV	9,0 kV
C	1. Test:	5,0 kV	8,0 kV	10,0 kV	10,5 kV
	2. Test:	6,5 kV	9,5 kV	11,5 kV	11,0 kV

I de fleste tilfellene, for Kabelskjøt A og B, registreres det tenning ved omtrent samme spenningsverdier for begge testene. Målingen som skiller seg ut for disse to kabelskjøtene er ved 0,1 Hz i Kabelskjøt A. Under tennspenningstesten registreres det utladninger ved 6,5 kV, mens det i test nummer to kreves 8,5 kV for at det skal oppstå utladninger. Grunnen til dette kan være de forskjellige forholdene i forkant av målingene [27].

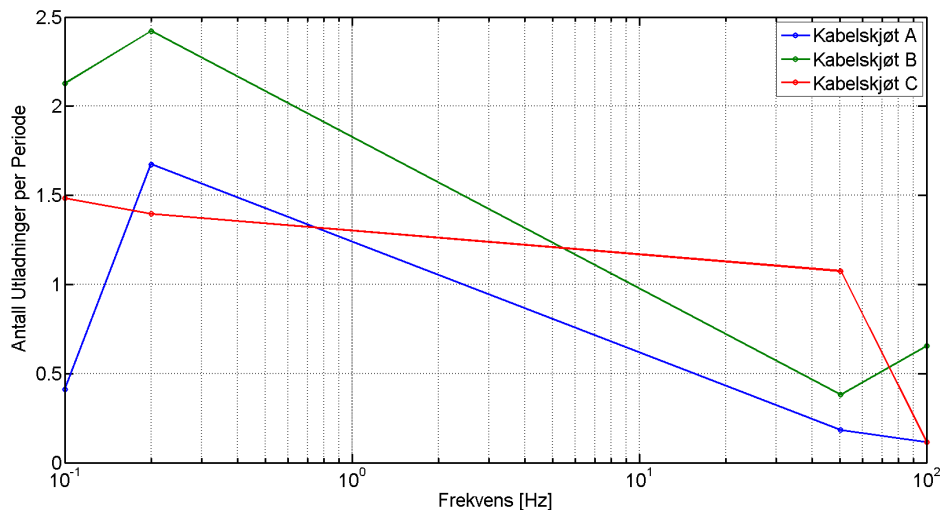
For målingene gjort i Kabelskjøt C, er tennspenningen høyere under andre måling, ved alle frekvensene. Økningen ved de tre laveste frekvensene er på 1,5 kV, mens den ved 100 Hz er 0,5 kV. Med denne økningen vil det fremdeles gi samme frekvensavhengighet i forhold til tennspenning. Tennspenningen ved de høyeste frekvensene er oppunder $2 \cdot U_0$, mens den fremdeles er i området rundt U_0 ved 0,1 Hz.

4.3.2 Statistiske måleresultater

Antall utladninger per periode, ved de fire forskjellige frekvensene er vist i Figur 4.6.

De to eneste tilfellene, hvor det registreres mer enn to utladninger per periode, er ved 0,1 og 0,2 Hz i Kabelskjøt B. Dette betyr at de resterende tilfellene garantert har halvperioder hvor det ikke registreres utladninger.

Den generelle tendensen er at det er flere utladninger ved 0,1 og 0,2 Hz, i forhold til 50,2 og 100 Hz. Dette til tross for at den påtrykte spenningen i alle tilfellene er høyere ved de to høyeste frekvensene. Siden det måles i området rundt tennspenning, ved alle frekvensene, antas det at det lokale elektriske feltet, hvor det oppstår utladninger, er omtrent like stort.



Figur 4.6: Antall utladninger per periode for alle tre kabelskjøtene, hentet fra 600 tilfeldige sammenhengende perioder. Målinger er gjort ved 0,1, 0,2, 50,2 og 100 Hz.

Den gjennomsnittlige størrelsen på utladningene ligger, ved de tre laveste frekvensene, i området 8 - 20 pC, som vist i Figur 4.7. Dette vises også i PRPDA-plottene i Vedlegg C.2, hvor utladningene hovedsakelig registreres innenfor det nevnte størrelsesområdet.

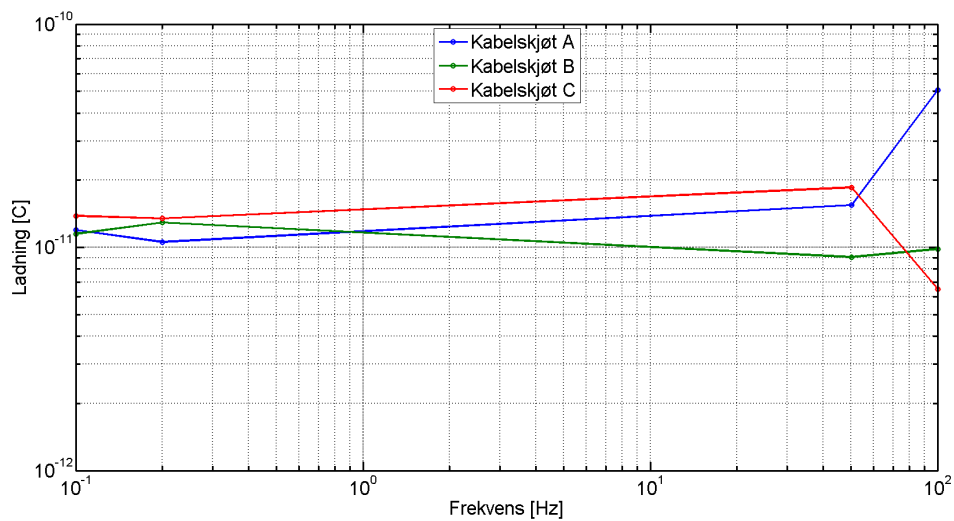
Ved 100 Hz er den gjennomsnittlige størrelsen mellom 6 og 60 pC, som er litt utenfor intervallet ved de andre frekvensene. Grunnen til den høye gjennomsnitts-

størrelsen i Kabelskjøt A, ved 100 Hz, kan være at tennspenningen har blitt definert til å være høyere enn det den egentlig er. Dette ble forklart nærmere i Kapittel 4.2.2. I tillegg registreres det en del utladninger som ligger i området 200 - 300 pC, som bidrar til høyere gjennomsnittsstørrelse på utladningene, ved denne frekvensen i Kabelskjøt A.

Som nevnt i Kapittel 2.2, oppstår de laveste utladningene når det lokale elektriske feltet er lik den lokale holdfastheten. Når dette er tilfelle, betyr det at det elektriske feltet ligger akkurat på tenningsnivå.

Målingene i Figur 4.7 viser utladninger nesten ned mot den satte støygrensen, som betyr at utladningene er relativt små. Dette kan derfor være en indikator på at det opereres rundt tennspenning. Støygrensene vises i Vedlegg C.3.

Siden den gjennomsnittlige utladningen er relativt lik i de fleste tilfellene, tyder det på at det lokale feltet i utladningsområdet er likt. Dette til tross for at spenningen er forskjellig, ved de forskjellige frekvensene.



Figur 4.7: Gjennomsnittlig ladning (absoluttverdi) per utladning for alle tre kabelskjøtene, hentet fra 600 tilfeldige sammenhengende perioder. Målinger er gjort ved 0,1, 0,2, 50,2 og 100 Hz.

4.4 Pulssekvensanalyse (PSA)

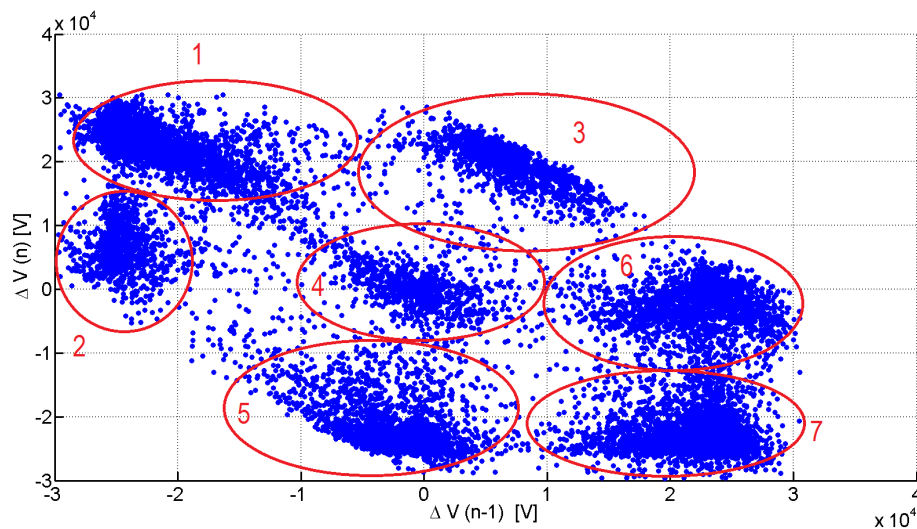
I denne delen har det blitt valgt å fokusere på hva som skjer i Kabelskjøt C. Dette er for å begrense mengden data som analyseres, og gi en bedre oversikt over analysemetoden. Det har i tillegg blitt valgt å se på forskjellene mellom 50,2 og 0,1 Hz. Dette er, som nevnt tidligere, fordi det er disse to frekvensene som brukes ved PD-måling i felt.

Resultater for alle kabelskjøtene, fra PS-analysen, finnes i Vedlegg C.4.

4.4.1 Spenningsendring

Spenningsendring, 50,2 Hz

Resultatene fra Kabelskjøt C, ved 50,2 Hz, vises i Figur 4.8. Her er det syv samlinger av punkter, fordelt langs diagonalen fra øverst til venstre, mot nederst til høyre.



Figur 4.8: Spenningsendring mellom utladninger i Kabelskjøt C. Målingen er gjort ved 11,5 kV og 50,2 Hz, som er akkurat ved tenningspenning under disse forholdene. Måleperioden er på 5 minutter. Det vises syv hovedsamlinger av punkter, som markert i figuren.

Ved å ta utgangspunkt i metoden beskrevet i Kapittel 3.6.1, har område 1 og 7 både høy x- og y-verdi, hvor den ene er positiv, mens den andre er negativ. De høye verdiene betyr at det har vært en stor spenningsendring mellom utladningene, som vil si at det er få utladninger i disse periodene. Siden både x- og y-verdien er stor,

betyr det at dette er tilfelle i tre utladninger på rad.

Det eneste området som har lav verdi, både på x- og y-aksen, er område 4. Plottene i dette området viser tilfeller hvor tre utladninger har oppstått innenfor en liten spenningsendring.

De resterende områdene har én høy og én lav verdi. Dette er områder hvor det har skjedd en stor spenningsendring mellom to av de tre utladningene, mens det har vært en mindre spenningsendring i det andre tilfellet.

Tabell 4.2 viser hvordan inndelingen blir for Figur 4.8.

Tabell 4.2: Karakterisering av områdene fra pulssekvensanalysen i Figur 4.8. Høy og Lav betyr henholdsvis høy og lav absoluttverdi langs den aktuelle aksene. Positiv og Negativ forteller hvilket fortegn verdien har.

Område	x-verdi		y-verdi	
	Størrelse	Fortegn	Størrelse	Fortegn
1	Høy	Negativ	Høy	Positiv
2	Høy	Negativ	Lav	Positiv
3	Lav	Positiv	Høy	Positiv
4	Lav	Positiv/Negativ	Lav	Positiv/Negativ
5	Lav	Negativ	Høy	Negativ
6	Høy	Positiv	Lav	Positiv/Negativ
7	Høy	Positiv	Høy	Negativ

Siden de fleste punktene har minst én høy verdi, langs x- eller y-aksen, betyr det at det ofte er få utladninger per periode. Samtidig er det to store områder med både høy x- og y-verdi, mens det kun er ett lite område med to lave verdier.

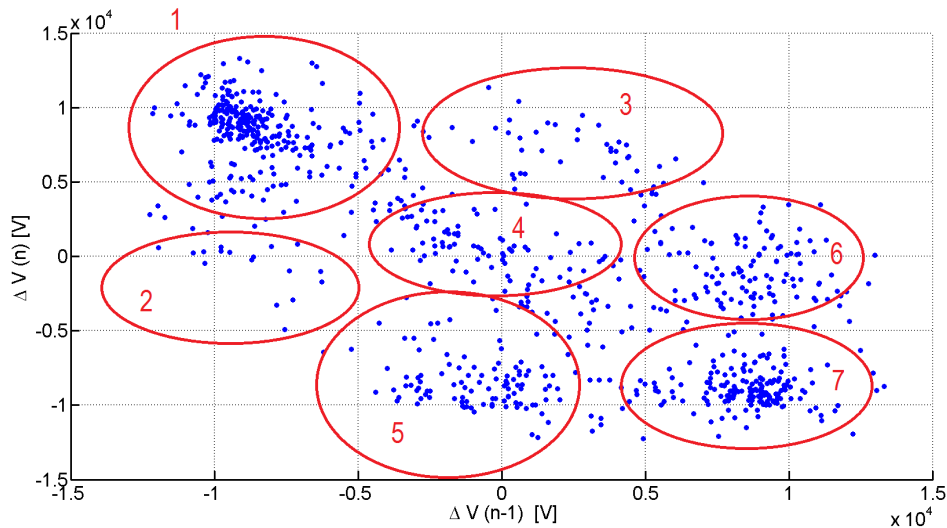
De små spenningsendringene kan være eksempler på at det oppstår utladninger flere steder i isolasjonen.

Spenningsendring, 0,1 Hz

Målingen gjort ved 0,1 Hz, i Kabelskjøt C, er vist i Figur 4.9. I dette tilfellet er det kun målt i 600 perioder, mens det ved 50,2 Hz måles i ca. 15000 perioder. Likevel kan det ses en sammenheng mellom de to målingene.

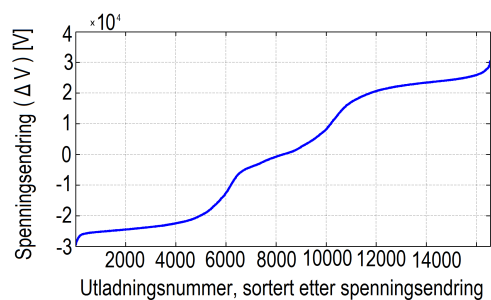
Område 1 og 7 skiller seg mest ut i Figur 4.9. Konsentrasjonen av punkter er

relativt høy i begge disse områdene. Som beskrevet i tilfellet ved 50,2 Hz, betyr dette at det har vært tre utladninger på rad, hvor spenningsendringen har vært relativt stor. Dette betyr få utladninger per periode. Samtidig er det noen tilfeller hvor det har oppstått tre utladninger innenfor en liten spenningsendring. Dette kan også her bety at det er flere områder hvor det oppstår utladninger.

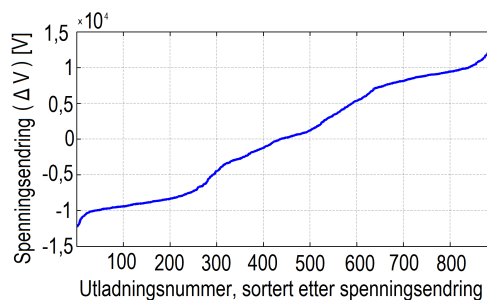


Figur 4.9: Spenningsendring mellom utladninger i Kabelskjøt C. Målingen er gjort ved 6,5 kV og 0,1 Hz, som er akkurat ved tennspenning, under disse forholdene. Måleperioden er på 100 minutter. Også her kan punktene deles inn i syv forskjellige områder, som ved 50,2 Hz (Figur 4.8).

Figur 4.10 viser spenningsendringen mellom utladningene, sortert etter størrelse, for Kabelskjøt C ved 0,1 og 50,2 Hz. De to tilfellene har omtrent lik fasong på plottet, med relativt liten stigning i starten og slutten, og større stigning i midten.



(a) 50,2 Hz



(b) 0,1 Hz

Figur 4.10: Sortert spenningsendring mellom utladninger i Kabelskjøt C, ved 0,1 og 50,2 Hz. Alle spenningsendringene finnes langs x-aksen, og kan leses av på y-aksen. Fasongen på plottene er relativt lik i forhold til stigning. Begge figurene finnes også i Vedlegg C.4

Plottene i Figur 4.10 vises også i Vedlegg C.4, sammen med tilfellene fra de andre målingene.

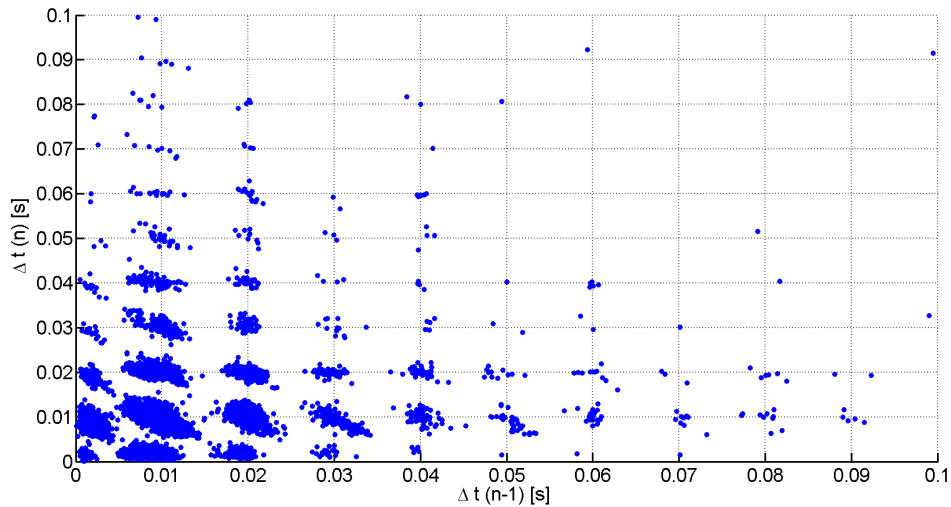
4.4.2 Tidsforskjell

Det blir også sett på tidsforskjellen mellom utladningene. Også her blir de tatt utgangspunkt i Kabelskjøt C.

Tidsforskjell, 50,2 Hz

I Figur 4.11 vises resultatene fra Kabelskjøt C, ved 50,2 Hz. Området som har punkter med 0,01 sekunder, som både x- og y-verdi, er det største i denne figuren. Én halvperiode er ca 0,01 sekunder, ved 50,2 Hz, som da betyr at plottene i dette området tilsvarer én utladning per halvperiode.

I tillegg er det flere områder som har 0,01 sekunder som enten x- eller y-verdi. Dette betyr at tidsforskjellen mellom to av de tre utladningene, i disse tilfellene, er 0,01 sekunder.



Figur 4.11: Tidsforskjell mellom utladninger i Kabelskjøt C. Målingene er gjort ved 11,5 kV og 50,2 Hz, som er akkurat ved tennspenning under disse forholdene. Måleperioden er på 5 minutter. Det største området med punkter ligger i området rundt (0,01, 0,01). Én periode varer i ca 0,02 sekunder når frekvensen er 50,2 Hz. Punkter i dette området representerer derfor én utladning per halvperiode.

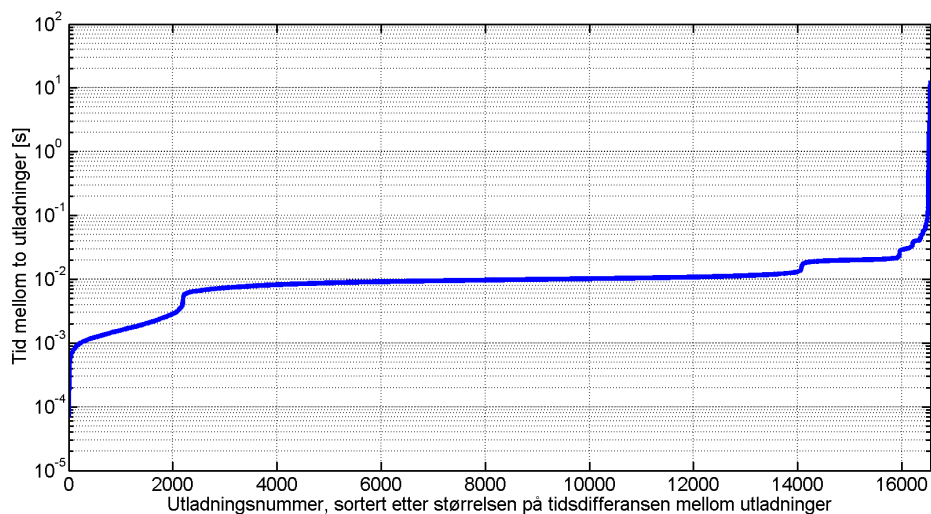
Alle tidsforskjellene, mellom utladningene, vises i stigende rekkefølge i Figur 4.12. Hver verdi langs x-aksen tilsvarer en tidsdifferanse mellom to utladninger, som kan leses av på y-aksen.

Fra nummer 4000 til 14000 ligger differansen på 0,01 sekunder. Dette tilsvarer, som nevnt, én utladning per halvperiode.

Nummer 2000-4000 ligger litt under 0,01 sekunder, som vi si at det her er litt flere utladninger per halvperiode.

Nummer 14000-16000 ligger på 0,02 sekunder. Dette tilsvarer én utladning per periode.

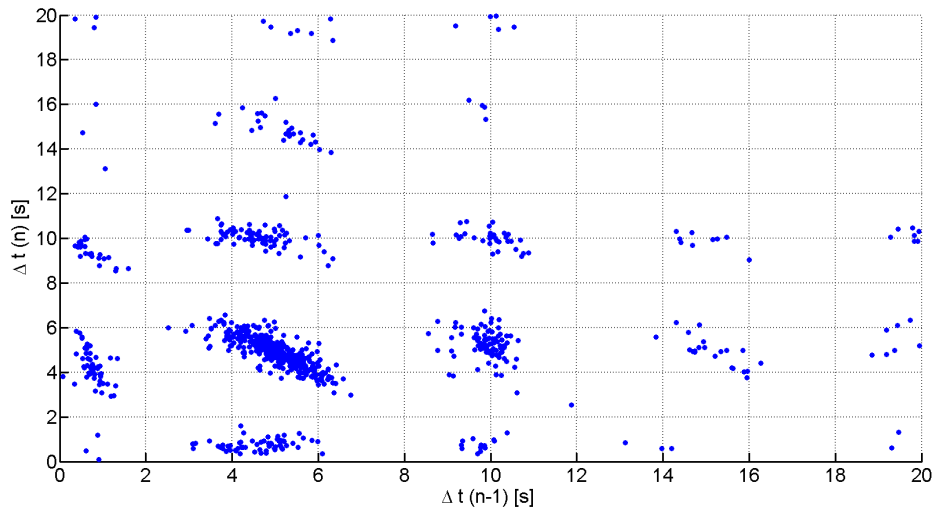
Resultatene viser mye det samme som Figur 4.8, men det vises også at det er enkelte perioder hvor det ikke oppstår utladninger i det hele tatt.



Figur 4.12: Tidsforskjellen, mellom utladninger, plottet i stigende rekkefølge. Målingene er fra Kabelskjøt C, og utført ved 11,5 kV og 50,2 Hz. Dette er akkurat på tennspenningen. Måleperioden er på fem minutter. Ca. 14000 av 16500 tidsdifferanser ligger i området rundt 0,01 sekunder

Tidsforskjell, 0,1 Hz

Resultatene ved 0,1 Hz, i Kabelskjøt C, vises i Figur 4.13. Området som har punkter med 5 sekunder, både som x- og y-verdi, er det største i denne figuren. Siden frekvensen er 0,1 Hz, betyr det at punktene i dette området representerer tre utladninger som har kommet i hver sin halvperiode, uten å ha utladningsfrie halvperioder. Hovedandelen av de andre områdene har også x- eller y-verdi lik 5 sekunder.

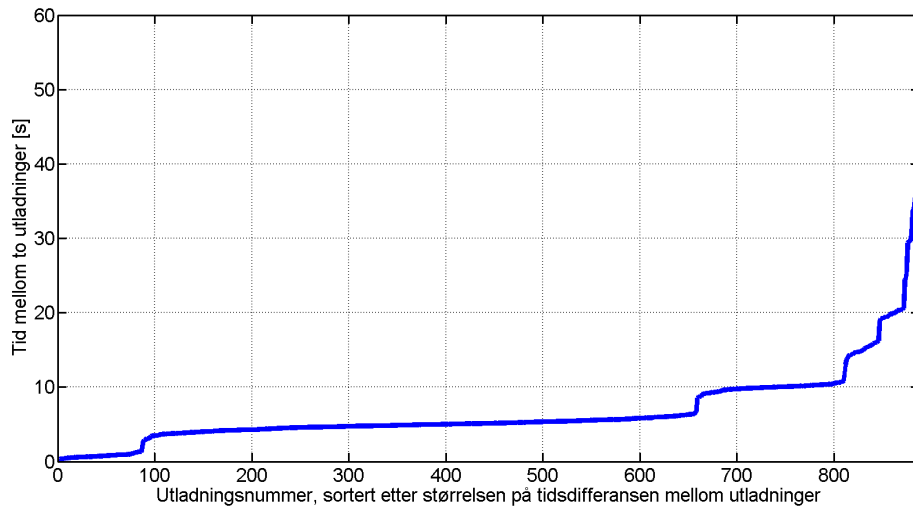


Figur 4.13: Tidsforskjell mellom utladninger i Kabelskjøt C. Målingene er gjort ved 6,5 kV og 0,1 Hz, som er akkurat ved tennspenningsnivå under disse forholdene. Måleperioden er på 100 minutter. Det største området med punkter ligger i området rundt (5, 5). Periodetiden, ved 0,1 Hz er 10 sekunder, så 5 sekunder mellom to utladninger tilsvarer én utladning per halvperiode.

Figur 4.14 viser at de fleste tidsdifferansene er på ca. 5 sekunder. Dette betyr at det, i de fleste tilfellene, kun er én utladning per halvperiode.

Også ved denne frekvensen er det tilfeller hvor det kun er én utladning per periode. Dette skjer mellom nummer 650 og 800, så i ca. 150 tilfeller.

De 80 korteste tidsintervallene representerer tilfeller hvor det har oppstått flere utladninger per halvperiode. I tillegg er det noen perioder uten utladninger. Den største tidsdifferansen er 55 sekunder. Dette vil si at det har gått fem og en halv periode uten at det har oppstått noen utladninger.



Figur 4.14: Tidsforskjell mellom utladninger, plottet i stigende rekkefølge. Målingene er fra Kabelskjøt C, og utført ved 6,5 kV og 0,1 Hz. Dette er akkurat på tennspenningsnivå. Måleperioden er på 100 minutter. De fleste tilfellene ligger i området rundt 5 sekunder, som tilsvarer én utladning per halvperiode. I tillegg er det en del som ligger rundt 10 sekunder, som betyr én utladning per periode.

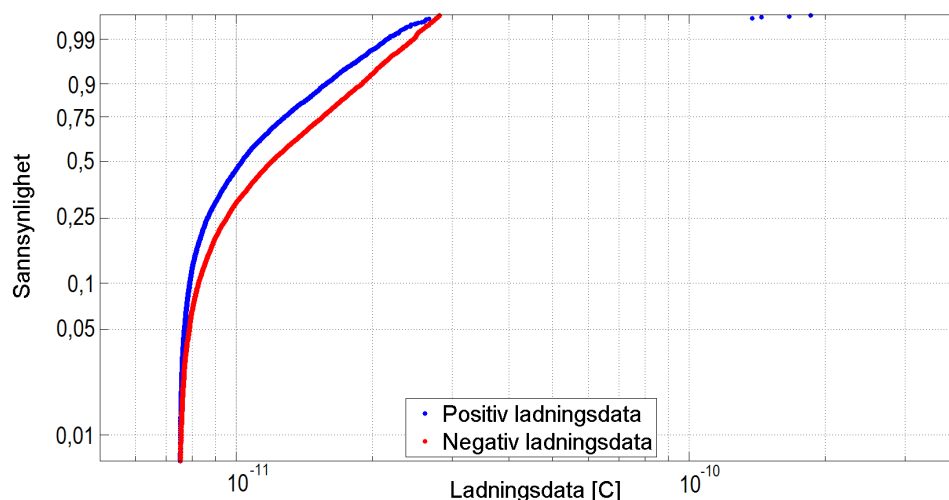
4.5 Weibull-analyse

4.5.1 Kumulativ fordeling

Ved å plote de positive og negative utladningene i Weibull-plot, finnes den kumulative fordelingen av utladningene. Dette gjøres for tre kabelskjøter, ved fire forskjellige frekvenser, som gir tolv forskjellige plot. Resultatet fra Kabelskjøt C, ved 50,2 Hz vises i Figur 4.15.

I elleve av tolv tilfeller er tendensen veldig lik, når det gjelder den kumulative fordelingen. Stigningen i starten av plottet er veldig stor, før den etterhvert avtar, som vist i Figur 4.15. Siden det, i disse elleve tilfellene, er *to* ganske tydelige stigninger, separeres både den positive og negative fordelingen i to deler. Metoden som brukes, beskrives i Kapittel 3.6.2. Deretter finnes nye α - og β -verdier.

Plot av kumulativ ladningsfordeling, for alle de tolv målte tilfellene, vises i Vedlegg C.5.1.

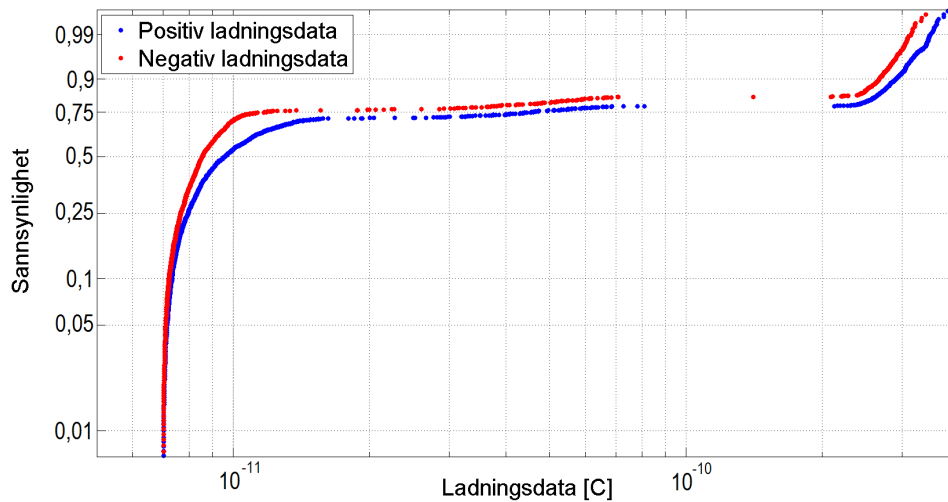


Figur 4.15: Positiv og negativ ladningsfordeling, Kabelskjøt C, 50,2 Hz. Utladninger som er mindre enn 8,2 pC regnes som små. Utladninger som er større enn 10 pC regnes som store.

Når utladningene separeres i flere deler, omtales de som ”store” og ”små” utladninger. Hvilke utladninger som regnes som store og små, i de forskjellige tilfellene, vises i Tabell C.2 til C.4.

Det eneste tilfellet som ikke har lik fordeling som resten, er målingen gjort i Ka-

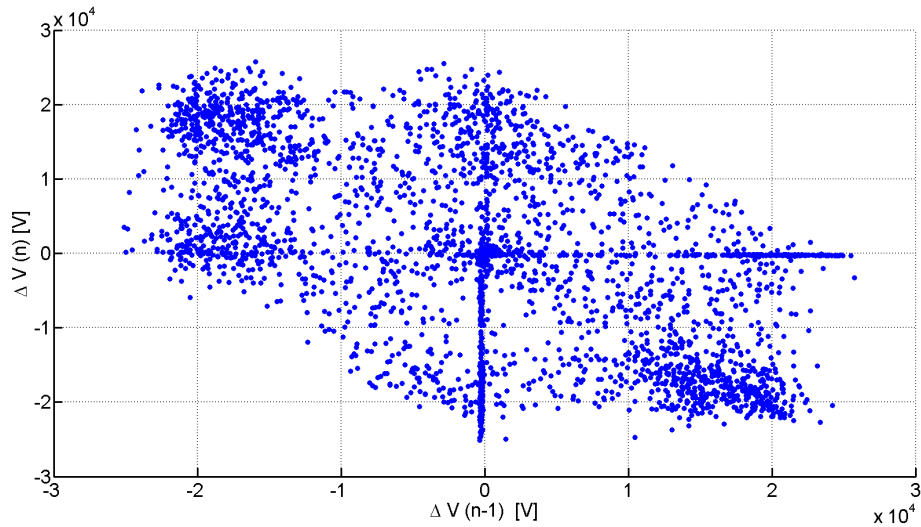
belskjøt A, ved 100 Hz. I dette tilfellet har fordelingen to buer, som kan tyde på at det er tre fordelinger av ladninger, og ikke to, som i de elleve andre tilfellene. Dette vises i Figur 4.16.



Figur 4.16: Positiv og negativ ladningsfordeling, Kabelskjøt A, 100 Hz. Eneste tilfellet med tre forskjellige fordelinger, både for positive og negative utladninger. Utladningene som er mindre enn 8,0 pC regnes som små. Utladninger mellom 20 og 100 pC regnes som mellomstore, mens utladninger større enn 200 pC regnes som store.

Siden målingen ved 100 Hz i Kabelskjøt A skiller seg ut, i forhold til de tolv andre tilfellene, kan det være interessant å se hvordan pulssekvensanalysen er i dette tilfellet.

Figur 4.17 viser spenningsendringen mellom utladningene i dette tilfellet. Det er tydelig at det er en del utladninger som har veldig liten spenningsendring mellom seg, siden det er mange punkter langs x- og y-aksens nullverdi. Dette kan tyde på flere forskjellige utladningsområder, som stemmer godt overens med resultatene i Figur 4.16. Denne samlingen med punkter langs aksene er ikke tilfelle i Figur 4.8.



Figur 4.17: Spenningsforskjell mellom utladninger, plottet etter prinsippet beskrevet i Kapittel 2.4.2. Målingene er fra Kabelskjøt A, utført ved 10,5 kV og 100 Hz. Måleperioden er på fem minutter.

4.5.2 Formfaktor

Etter at fordelingene har blitt separert, og formfaktorene har blitt beregnet, plottes disse som funksjon av frekvens. β -verdiene, for de positive utladningene i Kabelskjøt A, vises i Figur 4.18.

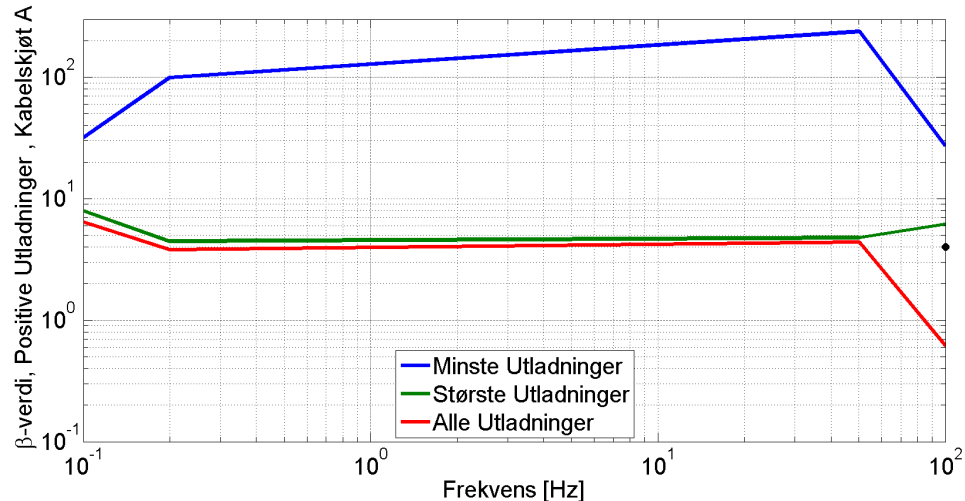
I tillegg til å vise formfaktoren til de to fordelingene, vises også formfaktoren til alle utladningene samlet.

For de minste utladningene er β -verdien betydelig større enn for de største. Dette er på grunn av den kraftige stigningen for de små utladningene, som vist i Figur 4.16.

For de største utladningene, er β -verdien veldig lik den som representerer alle måleverdiene. Dette gjelder for alle frekvensene, bortsett fra 100 Hz. Den reduserte β -verdien ved 100 Hz, er sannsynligvis påvirket av de minste utladningene. I tillegg er det en tredje fordeling, ved 100 Hz, som kan påvirker forholdet mellom den røde og grønne grafen.

Frekvensavhengigheten ser ut til å være relativt liten for de største utladningene, mens den for de minste varierer mellom 27 og 240. For de to andre kabelskjøtene er det heller ingen tydelig sammenheng mellom frekvens og β -verdi.

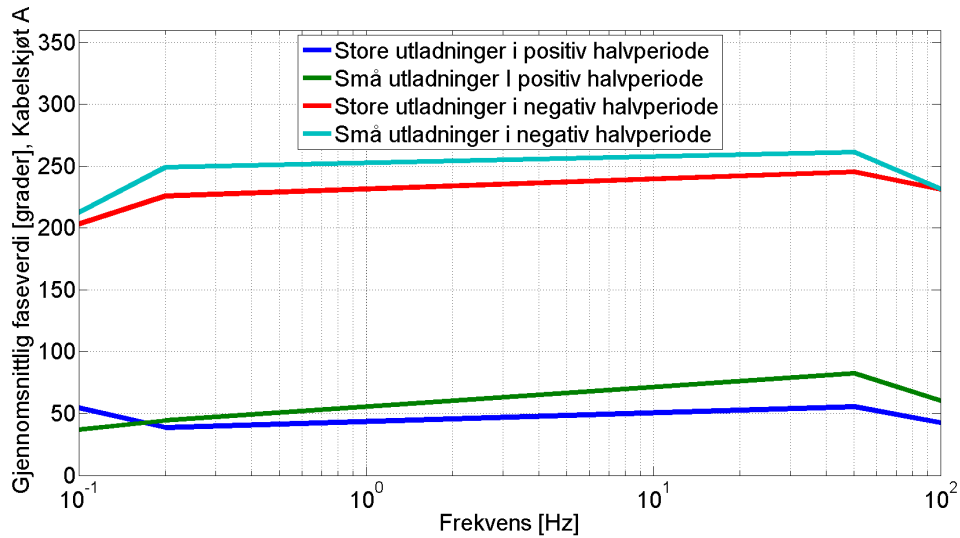
Formfaktoren, for både positive og negative utladninger, til alle tre kabelskjøtene finnes i Vedlegg C.5.2.



Figur 4.18: β - verdi for positive utladninger i Kabelskjøt A. Den røde grafen viser β -verdien for alle utladningene samlet. Den blå grafen viser β -verdien til de minste utladningene, mens den grønne viser for de største. Det svarte punktet, ved 100 Hz, representerer β -verdien til ladningene mellom 20 og 100 pC. Dette er det eneste tilfellet hvor ladningene separeres i tre fordelinger. Se Figur 4.16

4.5.3 Faseverdi av separerte utladninger

Etter å ha separert utladningene i to forskjellige fordelinger, plottes de hver for seg i PRPDA-plot, som vist i Vedlegg C.5.3. Den gjennomsnittlige faseverdien i Kabelskjøt A vises i Figur 4.19. Utladningene er her separert etter hvilken halvperiode de er i, og ikke etter polariteten til utladningene. Dette er fordi det, i enkelte tilfeller, er både positive og negative utladninger i begge halvperioder. Det er likevel flest negative utladninger i positiv halvperiode, og motsatt i negativ halvperiode, så plottet i Figur 4.19 viser likevel tendensen i faseverdien til det store og små utladningene.



Figur 4.19: Gjennomsnittlig faseverdi for store og små utladninger i Kabelskjøt A. Faseverdiene er plottet for positiv og negativ halvperiode. Det er en liten faseforskyvning, både i positiv og negativ halvperioder, mellom store og små utladninger.

Det er en tydelig faseforskyvning i de fleste tilfellene i Figur 4.19, men dette kan komme av at utladningene er fordelt over et større område, som vist i PRPDA-plottene i Vedlegg 4.19. Dette kan være støy som ikke har blitt filtrert bort.

For de to andre testobjektene er det ingen tydelig faseforskyvning mellom store og små utladninger. Her er det heller ikke utladningene spredt over et større område, som tilfellet er i Kabelskjøt A. Gjennomsnittlig faseverdi, for Kabelskjøt B og C, finnes i Vedlegg C.5.3.

4.6 Isolasjonsresistivitet

Ved måling av isolasjonsmotstanden, er resultatene målt ved 1000 V veldig like for alle tre kabelskjøtene. Ved 5000 V påtrykt spenning varierer resultatene noe, men alle tre skjøtene kan sies å være høyohmige.

Tabell 4.3: Isolasjonsmotstand i testobjektene, målt ved megging.

	1000 V	5000 V
Kabelskjøt A	300 GΩ	300 GΩ
Kabelskjøt B	300 GΩ	800 GΩ
Kabelskjøt C	300 GΩ	200 GΩ

Siden alle tre skjøtene har relativt høy motstand, kan dette tyde lite aldring.

4.7 Gjennomslagstest

Tabell 4.4: Gjennomslagsstyrke i testobjektene. Spenningen økes med 5 kV hvert minutt, til det oppstår gjennomslag.

	Gjennomslagsstyrke [kV]
Kabelskjøt A	80
Kabelskjøt B	80
Kabelskjøt C	> 120

Gjennomslagsstyrken til Kabelskjøt A og B er omtrent lik, og ligger rundt 80 kV. I Kabelskjøt C oppstår det ikke gjennomslag før den påtrykte spenningen er over 120 kV. Resultatene viser dermed at alle tre testobjektene har gjennomslagsstyrke større enn $13 \cdot U_0$

I Kabelskjøt A og C var det ingen synlige skader rett etter gjennomslag. I Kabelskjøt B derimot, begynte det å brenne i den ene enden av selve skjøten. Det var tydelig karbonisering i området, og ytre halvleder på kabelen hadde flere sprekker.

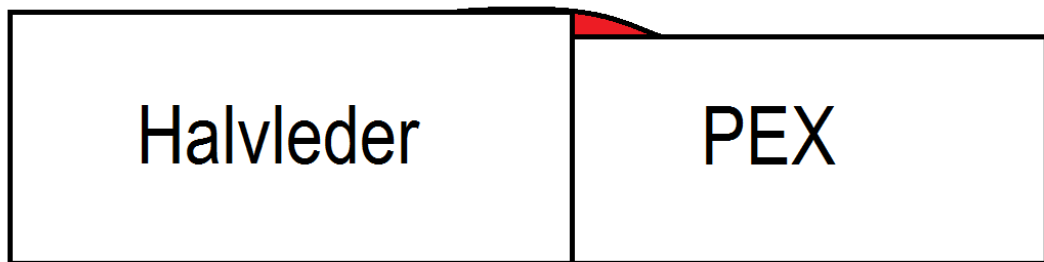
4.8 Disseksjon

Etter å ha dissekert skjøtene, observeres det et hulrom i overgangen mellom ytre halvleder på kabelen og PEX-isolasjonen. Dette er tilfelle både i Kabelskjøt A og B, som har hatt gjennomslag akkurat i denne overgangen. I Kabelskjøt C oppstår gjennomslaget ca. 1 cm inn på isolasjonsdelen. Bilder av alle tre tilfellene vises i Vedlegg G.

Gjennomslagstesten viser at Kabelskjøt A og B har omtrent like høy gjennomslagsstyrke, mens Kabelskjøt C tåler betydelig høyere spenning før det oppstår gjennomslag. Det kan derfor ses en sammenheng mellom gjennomslagsstyrke og gjennomslagsområde.

I Kabelskjøt B og C oppstår gjennomslaget i kabelen med stripbar halvleder, mens det i Kabelskjøt A oppstår i kabelen uten stripbar halvleder.

Selve isolasjonsdelen i skjøten ser ikke ut til å ha tegn til aldring som følge av varme eller oksidasjon.



Figur 4.20: Overgangen fra halvleder til isolasjon gir et glippe (rødt område) på grunn av høydeforskjellen. Dette skjer fordi skjøtekroppen ikke krympes helt inntil kabelen. I testobjektene i denne oppgaven brukes silikonfett for å tette igjen dette glippet.



Figur 4.21: Gjennomslagsområde i Kabelskjøt A. Gjennomslaget har oppstått i området mellom halvleder og isolasjonen. Det er tydelige spor av utladninger langs den ytre halvlederen.

5 Diskusjon

5.1 Dielektrisk responsmåling

Ved redusert frekvens, øker tapsfaktoren til alle kabelskjøtene. Dette kommer av den dominerende effekten til den resistive strømmen i isolasjonen. Siden tapsfaktoren, ifølge Ligning 2.9, er lik forholdet mellom den resistive og kapasitive strømmen, vil den øke dersom den resistive strømmen øker, eller den kapasitive strømmen minker. Når frekvensen endres, endres også den kapasitive strømmen proporsjonalt med frekvensen. Siden den resistive strømmen er konstant, vil forholdet mellom de to strømmene økes, når frekvensen reduseres, og en større tapsfaktor kan da forventes.

Det at tapsfaktoren er lavere for Kabelskjøt C, enn for de to andre kabelskjøtene, kan betyr at ledningsevnen er lavere i dette testobjektet. Ledningsevnen økes med aldring, som kan være en grunn til de forskjellige tapsfaktor-målingene. Motstandsmålingene viser derimot at motstanden er relativt lik for de tre skjøtene. Målingen for Kabelskjøt C, ved 5000 V, viser til og med at motstanden i dette testobjektet er lavere enn i de to andre, som igjen betyr høyere ledningsevne.

Endringen av tapsfaktoren, som funksjon av spenning, er størst ved de lave frekvensene. Grunnen til dette kan være den dominerende effekten av den resistive strømmen ved redusert frekvens. Forholdet mellom $\tan(\delta)$ ved 0,1 og 50,2 Hz ligger, ved alle spenningsverdiene, mellom 3 og 7, som vist i Figur 4.4. Kabelskjøt A og B har jevn stigning, ved økende spenning opp til 9 kV. Kabelskjøt A fortsetter den jevne stigningen, mens Kabelskjøt B får en stigningsøkning i den siste spenningsendringen. For Kabelskjøt C er forholdet, mellom de to nevnte tapsfaktorene, veldig stabilt for alle fem spenningsverdiene. Stigningen er veldig liten, og forholdet er 5,3 og 5,6 ved henholdsvis 1 og 12 kV.

Målingene gjort før og etter 12 kV, viser veldig like resultater for tapsfaktoren ved alle spenningsverdiene. Dette tyder derfor på at det ikke har skjedd noen endringer i løpet av målesekvensene. Figurene som viser dette finnes i Vedlegg F.

5.2 Tennspenning

Målingene fra Figur 4.5 bekrefter at tennspenningen til kabelskjøtene er frekvensavhengig. Dette vil si at det lokale elektriske feltet påvirkes ulikt, i de eventuelle defektene, når spenningsfrekvensen varieres.

Det lokale elektriske feltet, i området hvor utladningene oppstår, skal i utgangs-

punktet være akkurat på tenningsnivå i de målte tilfellene. Men siden det brukes steg på 0,5 kV, vil den faktiske tenningsverdien kunne ligge innenfor et slikt intervall.

Det kreves også at det er et startelektron til stede, når tenningsnivået oppnås, hvis det skal oppstå en utladning. Dersom det antas at fire minutter er tilstrekkelig tid til at et elektron befinner seg på riktig sted til riktig tid, er det det elektriske feltet som avgjør ved hvilket spenningsnivå den første utladningen oppstår. Hvis det blir tatt utgangspunkt i denne antagelsen, betyr det enten at feltet satt opp av spenningen forsterkes forskjellig, ved de forskjellige frekvensene, eller at det er et ekstra felt som settes opp lokalt. Dette kan være fra rom- eller overflateladning.

Variierende utladningsaktivitet, ved forskjellige frekvenser, kan forklares ved forskjellige mekanismer:

Ved høy konduktivitet, påvirkes den komplekse permittiviteten til isolasjonsmaterialet, som vist i Ligning 2.7. Siden dette er en effekt som økes ved redusert frekvens, økes også permittiviteten ved redusert frekvens. Dette gir igjen økt forsterkning i eventuelle hulrom. Dersom hulrommet er flatt, og vinkelrett på det elektriske feltet, forsterkes feltet med en faktor lik permittiviteten, som vist i Ligning 2.2. [2]

Den økende PD-aktiviteten, ved de lave frekvensene i dette prosjektet, kan være på grunn av endring i kompleks permittivitet, som en konsekvens av konduktivitet. Forholdet mellom den resistive og kapasitive strømmen, er betydelig større ved de lave frekvensene enn ved de høye, som vist i $\tan(\delta)$ -målingene. Den komplekse permittiviteten påvirkes derfor av frekvensen på spenningen, som en konsekvens av konduktivitet.

En annen effekt, som også påvirker utladninger ved forskjellige frekvenser, er overflateladning i hulrom. Dersom overflaten i hulrommene er ledende, vil dette føre redusert utladningsaktivitet ved lave frekvenser. [2]

Dersom tilstanden til en kabelskjøt skal vurderes ut ifra en måling som gjøres ved 0,1 Hz, er det viktig å ta høyde for de forskjellige tilfellene som er nevnt over. Dersom det ikke registreres utladninger ved denne frekvensen, kan det likevel oppstå utladninger ved 50 Hz.

I andre tilfeller kan det registreres utladninger ved 0,1 Hz, mens det under drift ikke oppstår utladninger i det hele tatt. Begge disse tilfellene kan føre til feildiasnosering av kabelskjøter, som kan være kostbart rent økonomisk.

Selv om det registreres utladninger, ved relativt lave spenningsverdier, betyr ikke dette nødvendigvis at skjøtene er i dårlig stand. Gjennomslagsstyrken til alle skjøtene er over $13 \cdot U_0$, som er betydelig høyere enn spenningen under drift. I tillegg er det ingen tydelige tegn til aldring av isolasjonen på innsiden av skjøtekroppen.

5.3 600 Perioder

Tennspenningen ved PD-måling nummer to ligger, i de fleste tilfellene, på omtrent samme nivå som ved første måling. Det er likevel noen avvik, som kan komme av forskjellig tilstand i forkant av målingene. [27]

For målingene gjort over 600 tilfeldige perioder, er det flere utladninger per periode ved de to laveste frekvensene enn de to høyeste. Dette til tross for at den påtrykte spenningen er lavere ved de to laveste frekvensene.

Størrelsen på utladningene er omtrent lik, ved alle frekvensene, som er en indikator på at feltstyrken i utladningsområdet er relativt lik. I tillegg er utladningene relativt små, som er en bekreftelse på at det opereres rundt tennspenningsnivå.

5.4 Pulssekvensanalyse

Pulssekvensanalysen viser at det hovedsakelig oppstår én utladning per periode, med relativt jevne mellomrom. Selv om det tidligere har blitt regnet ut hvor mange utladninger som oppstår per periode, sier ikke disse utregningene noe om når utladningene skjer. Pulssekvensanalysen brukes derfor for å vise hvordan utladningene oppfører seg i forhold til hverandre.

Siden verdiene som blir brukt i denne analysen er hentet fra målinger gjort ved tennspenning, er det forventet at det oppstår få utladninger per periode.

For plottet av spenningsendringen som skjer mellom to utladninger, er det syv forskjellige samlinger av punkter. Dette er tilfelle, både ved 50,2 og 0,1 Hz, i Kabelskjøt C, som vist i Figur 4.8 og 4.9. Én av disse samlingene befinner seg i området som har både x- og y-verdi lik null. Dette betyr at det har vært enkelte tilfeller hvor det har oppstått tre utladninger på rad, innenfor en liten spenningsendring.

Grunnen til dette kan være at det oppstår utladning flere steder i materialet. Resultater fra [28] og [29] viser et lignende plot, som har opphav i overflateutladninger. Når dette er tilfelle, trenger ikke utladningene å være begrenset til ett område. Dersom det skjer utladninger flere steder, vil det derfor være en veldig

liten spenningsendring mellom disse.

I tillegg til det nevnte området i Figur 4.8 og 4.9, er det flere områder som har liten x - eller y -verdi. Dette betyr at to av tre utladninger har hatt en liten spenningsendring mellom seg, som igjen kan være en indikator på at flere utladningsområder er aktive.

For de to andre kabelskjøtene er det også områder med spenningsendring rundt null ($\Delta V = 0$), som vist i Vedlegg C.4. Dette kan tyde på omtrent lik aldring for de tre fasene. Disseksjon viser at ingen av de tre skjøtene har tydelige tegn til aldring, ettersom PEX-isolasjonen ikke har noen form for misfarging eller deformering. De eneste områdene med synlige skader er i gjennomslagsområdene, som det er ett av i hvert testobjekt.

Dersom det ikke hadde vært noen punkter med veldig liten spenningsendring, men bare i områder med høye x - og y -verdier, ville dette vært et tegn på at det kun var ett sted hvor det oppsto utladninger. I så fall ville det mest sannsynlig vært et hulrom, ettersom utladningene, i et slikt tilfelle, er begrenset til et lite område.

Sannsynligheten for at overflateutladninger registreres, dersom det antas å være flere utladningsområder, er stor. Dette er fordi eventuelle hulromsutladninger er avhengig av både geometrien og beliggenheten til hulrommet. Og siden det i dette tilfellet måles ved tennspenning, er det kun områdene med holdfasthet på dette nivået som registreres. Om det registreres hulromsutladninger flere steder samtidig, når spenningen er akkurat på tenningsnivå, må hulrommene være relativt like, eller tilfeldigvis ha tennspenning ved samme nivå.

Ved å sortere spenningsendringene etter størrelse, vises resultatet i Figur 4.10. Ettersom antall utladninger ved 50,2 Hz er betydelig større enn ved 0,1 Hz, kan denne figuren vise den relative fordelingen av spenningsendringene. Formen på de to kurvene er relativt lik, som kan bety at tendensen i de to tilfellene er omtrent den samme. Dersom målingene ved 0,1 Hz hadde blitt gjort over en lengre periode, er det mulig at de to grafene hadde blitt enda mer lik.

Selv om det kan tyde på at det er flere områder hvor det oppstår utladninger, så er det likevel flest tilfeller hvor tidsdifferansen mellom to utladninger er lik halve periodetiden. Hovedandelen av utladninger kan derfor antas å komme fra én utladningskilde. Hulrommene som observeres under disseksjon av skjøtene, er sannsynligvis stedene hvor de fleste utladningene har oppstått. Det observeres ett hulrom i hver skjøt, men også mulige spor etter overflateutladninger.

5.5 Weibull-analyse

Ettersom pulssekvensanalysen antyder at det kan være flere utladningsområder i alle skjøtene, brukes Weibull-analysen til å se nærmere på akkurat dette.

Elleve av tolv målte tilfeller har veldig lik kumulativ fordeling, når størrelsen på utladningene plottes. Med en stor stigning i ene delen av fordelingen, og betydelig mindre stigning i den andre delen, kan det tyde på at utladningene oppstår to forskjellige steder.

Siden de kumulative fordelingene ikke har jevn stigning hele veien, kan de ikke karakteriseres ut ifra en to-parameters Weibull-funksjon.

Ved å dele fordelingene i to, regnes det ut fire α - og β -verdier, som representerer positive og negative utladninger i det aktuelle tilfellet. Fordelingen kan dermed karakteriseres ved hjelp av en fem-parameters Weibull-funksjon, som beskrevet i Kapittel 2.4.3, hvor små og store utladninger separeres. I disse elleve tilfellene antas det at det skjer utladninger i to forskjellige områder av isolasjonen.

Det tolvte tilfellet, som ikke har lik form på den kumulative fordelingen som de andre, kan se ut til å ha tre forskjellige utladningsområder. Denne målingen gjøres i Kabelskjøt A, ved 100 Hz. I dette tilfellet kan det tyde på at spenningen er litt høyere enn tennspenningen. Grunnen til denne antagelsen er mangel på en tredje utladningsfordeling ved de andre frekvensene i det samme testobjektet. Holdfastheten i et eventuelt tredje utladningsområde overgås derfor ikke ved tre av fire frekvenser, for Kabelskjøt A.

PSA-plottet, for det tilfellet som skiller seg ut i Weibull-fordelingen, viser at det er tydelige samlinger av punkter rundt nullverdien til både x- og y-aksen, som vist i Figur 4.17. Dette kan tyde på at det oppstår utladninger i flere områder samtidig. Likevel er det vanskelig å vite om det er to eller tre utladningsområder, ut ifra PSA-plottet.

PRPDA-plottet, av det nevnte tilfellet, vises Figur C.35. I tillegg til samlingen av utladninger ned mot støygrensen, er det også flere forskjellige samlinger av utladninger som er større enn dette. I den positive halvperioden er det tre samlinger av negative utladninger. Det er også tre samlinger av positive utladninger, hvor to er i negativ og én er i positiv halvperiode.

Formfaktorene (β -verdiene), som beregnes etter at fordelingene har blitt delt opp, viser ingen tydelig frekvensavhengighet. Verdiene varierer fra en frekvens til en

annen, men endringene er forskjellige i alle tre testobjektene. Positive og negative utladninger ser derimot ut til å ha relativt lik fordeling i forhold til hverandre, når hvert testobjekt ses på hver for seg. Formfaktorene vil kunne være avhengig av hvilke utladninger som karakteriseres som store og små, og dette kan være grunnen til de varierende resultatene i skjøtene.

De største utladningene har relativt lav β -verdi, mens den er betydelig større for de minste utladningene. Dette kommer av stigningene i de kumulative plottene.

5.6 Disseksjon

Disseksjonen av skjøtene viser at gjennomslaget i Kabelskjøt A og B har oppstått i overgangen mellom ytre halvleder og isolasjonen, som vist i Figur G.1 og G.2. På grunn av høydeforskjellen i overgangen mellom de to materialene, krympes ikke skjøtekroppen helt inntil kabelen, som fører til at det blir et glippe mellom de to delene (Figur 4.20). Det har derfor blitt smurt silikonfett i dette området, for å forhindre utladninger. Siden det likevel registreres utladninger under PD-målingene, og gjennomslaget oppstår i halvleder-PEX-overgangen, er silikonfettet ikke tilstrekkelig i disse tilfellene. Det har heller ikke blitt benyttet halvledende lakk, som ville gitt en jevnere overgang mellom de to områdene, og som muligens ville redusert den lokale feltforsterkningen.

I Kabelskjøt C oppstår gjennomslaget ca. 1 cm inn på isolasjonsdelen, som vist i Figur G.3. Gjennomslagsstyrken til dette testobjektet er 120 kV, i motsetning til de to andre skjøtene hvor den er ca. 80 kV. Siden gjennomslaget ikke har oppstått i overgangen mellom halvleder og isolasjon, har silikonfettet i denne skjøten vært tilstrekkelig til å stå imot spenningen. Utladningene som oppstår i Kabelskjøt C kan likevel komme fra dette området. Men det er også mulig at de har kommet fra en defekt i selve isolasjonen.

Grunnen til de to tilfellene av gjennomslagsområde, kan være fordi silikonfettet har fordelt seg over et større område i Kabelskjøt A og B, mens det i Kabelskjøt C har holdt seg rundt overgangen mellom halvleder og isolasjon. Dette er noe som kan ha skjedd under montering av skjøtene, eller i drift.

I Figur 4.21 vises tydelige spor av utladninger langs halvlederen. Dette kan ha oppstått under gjennomslagstesten, men det er også mulig at det er overflateutladninger som har oppstått her under PD-målingene. Dette stemmer i så fall godt overens med pulssekvens- og Weibull-analysen.

6 Konklusjoner

PD-målinger, som utføres i dette prosjektet, viser at tennspenningen til tre feltaldrede PEX-kabelskjøter er frekvensavhengig. Av ti frekvenser, mellom 0,1 og 100 Hz, er det kun de to laveste som skiller seg ut i forhold til tennspenning. Målingene ved 0,1 Hz gir utladninger ved rundt 6 kV, mens det ved 50 Hz kreves opp mot 11 kV for å starte den første utladningsprosessen. Driftsspenningen til skjøtene er 6,4 kV. Den frekvensavhengige utladningsaktiviteten kan komme av endring i kompleks permittivitet, som konsekvens av konduktivitet. Dette er en effekt som gir økt lokal feltforsterkning i utladningsområder, ved redusert frekvens.

På grunn av den frekvensavhengige utladningsaktiviteten, er det viktig å vurdere målemetoden som brukes, når kabelsystemer skal testes i felt. Disse målingene utføres ofte ved 0,1 eller 50 Hz, og kan gi forskjellige resultater.

Ved hjelp av Weibull- og pulsekvansanalyse, observeres det ingen tydelige forskjeller mellom de målte frekvensene. Det antydes derimot at flere utladningsområder kan være aktive, hvor hulrom- og overflateutladning er de to mest sannsynlige typene.

Ved å dissekere skjøtene observeres det både hulrom og spor etter overflateutladninger, som har oppstått i overgangen mellom halvleder og PEX-isolasjonen. Dette er et utsatt område, ettersom høydeforskjellen mellom de to materialene gjør at skjøtekroppen ikke krympes helt inntil kabelen, og skaper et hulrom mellom skjøt og kabel.

7 Videre Arbeid

Analysemetodene i denne oppgaven tar kun for seg fire forskjellige frekvenser. I tillegg til disse frekvensene, kunne det blitt sett på noen mellom 0,2 og 50 Hz. I tillegg kunne det vært interessant å se hvordan utviklingen av for eksempel tennspenningen er, dersom frekvensen reduseres ytterligere. For eksempel til 0,05 Hz.

Disseksjon av selve kablene kunne gitt ytterligere svar på tilstanden til de tre testobjektene. Dette ville vært neste steg i diagnoseringsen av skjøtene. Spesielt i Kabelskjøt C, hvor gjennomslaget ikke oppstår i overgangen mellom halvleder og isolasjon, men i stedet ca. 1 cm inn på isolasjonsdelen.

Referanser

- [1] R. Bodega, P. H F Morshuis, M. Lazzaroni, and F.J. Wester. Pd recurrence in cavities at different energizing methods. *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on*, 53(2):251–258, April 2004.
- [2] Hans Edin and Cecilia Forssén. Variable frequency partial discharge analysis of in-service aged machine insulation. In *Nordic Insulation Symposium (Nord-IS), Tampere, Finland*, pages 29–35, 2003.
- [3] Erling Ildstad. *Cable Technology, TET4195 High Voltage Equipment*. Department of Electric Power Engineering, 2009.
- [4] IEC. *60270, High-voltage test techniques - Partial discharge measurements*. IEC, 2000.
- [5] Lars Lundgaard. *Partielle utladninger Begreper, måleteknikk og mulige anvendelser for tilstandskontroll*. SINTEF Energy Research, 1996.
- [6] Eberhard Lemke Germany Sonja Berlijn Sweden, Edward Gulski Netherland, Michael Muhr Austria, Edwin Pultrum Netherland, Thomas Strehl Germany, Wolfgang Hauschild Germany, and Johannes Rickmann France. Guide for partial discharge measurements in compliance to iec 60270. 2008.
- [7] F.J. Wester, E. Gulski, and J.J. Smit. Detection of partial discharges at different ac voltage stresses in power cables. *Electrical Insulation Magazine, IEEE*, 23(4):28–43, July 2007.
- [8] Erling Ildstad. *High Voltage Insulation Materials*. Department of Electric Power Engineering, 2012.
- [9] Frederik H. Kreuger. *Industrial High Vol*. Delft University Press, 1992.
- [10] Insulated Conductors Committee of the IEEE Power Engineering Society. *DRAFT IEEE Guide for Partial Discharge Testing of Shielded Power Cable Systems in a Field Environment*. IEEE, 1999.
- [11] L. Niemeyer. A generalized approach to partial discharge modeling. *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, 2(4):510–528, Aug 1995.
- [12] Hans Edin. *Partial Discharge Studied with Variable Frequency of the Applied Volta*. PhD thesis, Kungl Tekniska Hogskolan, 2001.

- [13] C. Forssen and Hans Edin. Partial discharges in a cavity at variable applied frequency part 1: measurements. *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, 15(6):1601–1609, December 2008.
- [14] A. Helgeson and U. Gafvert. Dielectric response measurements in time and frequency domain on high voltage insulation with different response. In *Electrical Insulating Materials, 1998. Proceedings of 1998 International Symposium on*, pages 393–398, 1998.
- [15] Sverre Hvidsten. *ELK-30 Condition Assessment of High Voltage Apparatus, Power Cables, Dielectric response - Deneral description on cables*. SINTEF Energy Research, 2012.
- [16] H. Illias, Teo Soon Yuan, A.H.A. Bakar, H. Mokhlis, G. Chen, and P.L. Lewin. Partial discharge patterns in high voltage insulation. In *Power and Energy (PECon), 2012 IEEE International Conference on*, pages 750–755, Dec 2012.
- [17] A. Contin, G.C. Montanari, and C. Ferraro. Pd source recognition by weibull processing of pulse height distributions. *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, 7(1):48–58, Feb 2000.
- [18] M. Cacciari, A. Contin, and G.C. Montanari. Use of a mixed-weibull distribution for the identification of pd phenomena [corrected version]. *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, 2(6):1166–1179, Dec 1995.
- [19] S. Jiang and D. Kececioglu. Graphical representation of two mixed-weibull distributions. *Reliability, IEEE Transactions on*, 41(2):241–247, Jun 1992.
- [20] Ottar Amdal. *Masteroppgave: Tilstandskontroll av mellomspenning kabelsystem til vindpark*. Norges Teknisk-Naturvitenskapelige Universitet, Institutt for Elkraftteknikk, 2013.
- [21] Programma Products. *IDA 200, Insulation Diagnostics System*.
- [22] Knut Dahle Hammervoll. *Masteroppgave: Ikke-destruktiv tilstandskontroll av kabelskjøter i distribusjonsnett*. Norges Teknisk-Naturvitenskapelige Universitet, Institutt for Elkraftteknikk, 2010.
- [23] *MPD 600 User Manual, Manual Version: MPD600.AE.2, OMICRON electronics 2009*, 2009.
- [24] Hans Lavoll Halvorson. *Master's Thesis: Condition Assessment of Wind Farm Medium Voltage Cable Joints*. Norges Teknisk-Naturvitenskapelige Universitet, Institutt for Elkraftteknikk, 2012.

- [25] F. Mauseth, H. L. Halvorson, and S. Hvidsten. Diagnostic testing of thermally aged medium voltage xlpe cable joints. In *Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), 2012 Annual Report Conference on*, pages 823–826, Oct 2012.
- [26] Håkon Tollefsen. *Tilstandskontroll av Mellomspennings Kabelskjøter, Fordypningsprosjekt*. Norges Teknisk-Naturvitenskapelige Universitet, Institutt for Elkraftteknikk, 2013.
- [27] Cecilia Forssén and Hans Edin. Measured partial discharge inception voltage for a cavity at different applied frequencies. In *Proc. Nordic Insulation Symposium (Nord-IS 07)*, pages 59–62, 2007.
- [28] M. Hoof and R. Patsch. Voltage-difference analysis, a tool for partial discharge source identification. In *Electrical Insulation, 1996., Conference Record of the 1996 IEEE International Symposium on*, volume 1, pages 401–406 vol.1, Jun 1996.
- [29] R. Patsch and M. Hoof. Pulse sequence analysis-what does it tell us about multiple discharge sites? In *Dielectric Materials, Measurements and Applications, Seventh International Conference on (Conf. Publ. No. 430)*, pages 133–136, Sep 1996.

A Matlab-script

A.1 Eksportering av data til Matlab-filer

```
% Clear all variables ,  
windows and the screen before running program  
clear all;  
clc;  
close all;  
tic  
  
%folder = current folder name;  
folder=pwd;  
%user define frequency  
f=input('Enter the frequency in Hz: ');  
%user define noise level for raw data  
noise=input('Enter the noise level , example: 2.5e 12: ');  
  
% Import Q data  
[q_tm, q]=importQData(folder, 'unit1.1');  
% Import phase data  
phase = importPHData(folder, 'unit1.1');  
phase=phase*360;  
  
% Import voltage data  
[v_tm, v] = importVData(folder, 'unit1.1');  
  
%create matrix with all needed raw data  
(charge time, charge, phase relation)  
qq = [q_tm, q, phase];  
  
%deletes PDs that are assumed to be  
background noise from raw data  
Ip=qq(:,2)<= noise ;  
qqp=qq(~Ip, :);  
In=qq(:,2)>= noise ;  
qqn=qq(~In, :);  
qq = [qqn; qqp];  
qq= sortrows(qq,1);  
  
%make copy of raw data
```

```

qqqq=qq;

%clear counters
clear('Ip') ;
clear('In') ;
clear('qqn') ;
clear('qqp') ;

%matrix with positive/negative charge only
Ip=qqqq(:,2) < 0 ;
qqp=qqqq(~Ip,:); %all the positive charges
In=qqqq(:,2) > 0;
qqn=qqqq(~In,:); %all the negative charges

%matrix with sorted positive/negative charge
qqpch=sort(qqp(:,2), 'descend');
qqnch=sort(qqn(:,2), 'ascend');

%Extract the top 1% of the
positive and negative charges
R1=ceil(numel(qqpch)*0.01);
qqpch2 = zeros(R1,1);
for r=1:R1;
    qqpch2(r,1)=qqpch(r,1);
end;

R1=ceil(numel(qqnch)*0.01);
qqnch2 = zeros(R1,1);
for r=1:R1;
    qqnch2(r,1)=qqnch(r,1);
end;

% calculations of statistics
% =====

%time recorded
ttot=max(qqqq(:,1));
disp('Total_time_recorded')
disp(ttot)

```

```

% number of cycles
Ns=ttot*f;
disp( 'Total_number_of_cycles ' )
disp(Ns)

%noise level
disp( 'noise_level ' )
disp(noise)

%sum of positive charge
Qptot=sum(qqp(:,2));
disp( 'sum_of_positive_charge ' )
disp(Qptot)

%sum of negative charge
Qntot=sum(qqn(:,2));
disp( 'sum_of_negative_charge ' )
disp(Qntot)

%sum of charge
Qtot=Qptot - Qntot;

%number of PD's registered
Npd=numel(qqqq(:,2));
disp( 'number_of_PD_registered ' )
disp(Npd)

%number of positive PD's registered
Npdp=numel(qqp(:,2));
disp( 'number_of_positive_PD ' )
disp(Npdp)

%number of negative PD's registered
Npdn=numel(qqn(:,2));
disp( 'number_of_negative_PD ' )
disp(Npdn)

%mean positive charge
qavp=Qptot/Npdp;

```

```

disp ( 'mean_positive_charge' )
disp (qavp)

%mean negative charge
qavn=Qntot/Npdn;
disp ( 'mean_negative_charge' )
disp (qavn)

%mean charge
qav=Qtot/Npd;
disp ( 'mean_charge' )
disp (qav)

%PDs pr cycle
Nps=Npd/Ns;
disp ( 'number_of_PD_pr_cycle' )
disp (Nps)

%max positive charge calculated from top 1%
qmax=sum(qqpch2)/numel(qqpch2);
disp ( 'maximum_charge_recorded' )
disp (qmax)

%max negative charge calculated from bottom 1%
qmin=sum(qqnch2)/numel(qqnch2);
disp ( 'minimum_charge_recorded' )
disp (qmin)

savefile='dataexport.txt';
save(savefile, 'ttot', 'Ns', 'noise', 'Qptot', ...
    'Qntot', 'Npd', 'Npdp', 'Npdn', ...
    'qavp', 'qavn', 'qav', 'Nps', ...
    'qmax', 'qmin', 'ascii', 'qq');
[s, msg] = replaceinfile ( '.', ',', ', ...
    'dataexport.txt');

savefile='chargedata.mat';
save(savefile, 'qqqq', 'ascii');

pdplot=[qq(:,2), qq(:,3)];

```



```

aksex=0:0.001:360;
sinusy=sind(aksex);
PH=pdplot(:,2);
Q=pdplot(:,1);

% Create figure
figure1 = figure;

% Create axes
axes1 = axes('Parent',figure1,'YTick',...
[ 4e 09 2e 09 0 2e 09 4e 09],...
'YGrid','on',...
'YColor',[0 0 1],...
'XGrid','on');
% Uncomment the following line to
preserve the X limits of the axes
xlim(axes1,[0 360]);
% Uncomment the following line to
preserve the Y limits of the axes
% ylim(axes1,[ 4e 012 4e 012]);
box(axes1,'on');
hold(axes1,'all');

% Create plot
plot(PH,Q,'Parent',axes1,'MarkerSize'...
,3,'Marker','x','LineStyle','none',...
'DisplayName','pd_activity');

% Create ylabel
ylabel('Q [pC]','Color',[0 0 1]);

% Create axes
axes2 = axes('Parent',figure1,'YTick',[ 1 0.5 0 0.5 1],...
'YAxisLocation','right',...
'YColor',[0 0.5 0],...
'ColorOrder',...
[0 0.5 0;1 0 0;0 0.75 0.75;0.75 0...
0.75;0.75 0.75 0;0.25 ...
0.25 0.25;0 0 1],'Color','none');

```

```

% Uncomment the following line to
preserve the X limits of the axes
xlim(axes2,[0 360]);
% Uncomment the following line to
preserve the Y limits of the axes
% ylim(axes2,[ 1 1]);
hold(axes2,'all');

% Create plot
plot(aksex,sinusy,'Parent',axes2,'LineWidth',...
2,'DisplayName','voltagepu');

% Create xlabel
xlabel('phase[degrees]');

% Create ylabel
ylabel('V[pu]','VerticalAlignment',...
'cap','Color',[0 0.5 0]);

% Create plot
plot(aksex,sinusy,'Parent',axes2,'LineWidth',2);

saveas(gca,'Faseplot.png');

% User interface for input of times
%t1=input('Enter the t1 in s: ');
%t2=input('Enter the t2 in s: ');

%find row numbers containing t1 and t2
%r1= find(qqq(:,1)>t1);
%r2= find(qqq(:,1)>t2);
%r1=r1(1);
%r2=r2(1);

% create matrix with data between the given times t1 and t2
%qq=qqq(r1:r2-1,:);
corona = zeros(length(qq),3);
for i=1:length(qq)
    if (qq(i,3)< 70 || qq(i,3)>280)
        corona(i,1) = qq(i,1);
    end
end

```

```
        corona(i,2) = qq(i,2);
        corona(i,3) = qq(i,3);
    end
end

nullelementer = sum(corona(:)==0);

toc
```

A.2 Weibull-funksjoner i Matlab

wblfit: Parameter estimates and confidence intervals for Weibull data.
PARMHAT = wblfit(X) returns maximum likelihood estimates of the parameters of the Weibull distribution given the data in X. PARMHAT(1) is the scale parameter, A, and PARMHAT(2) is the shape parameter, B.

A.3 Script til PSA-plot

A.3.1 Spenningsendring

```
[tid, ladning, fase] = textread('dataexport.txt', ...  
    '%f %f %f');
```

```
frekvens = input('Frekvens: ');  
spenning = input('Spenning: ');
```

```
spenning = spenning *sqrt(2);  
periode = 1/frekvens;  
figure(1)  
bar(sort(fase))
```

```
lengdexy = length(tid) / 2;
```

```
xy = zeros(lengdexy, 2);
```

```
for i = 1:lengdexy
```

```
    xy(i,1) = spenning*(cosd(fase(i+1)) ...  
        cosd(fase(i)));  
    xy(i,2) = spenning*(cosd(fase(i+2)) ...  
        cosd(fase(i+1)));
```

```
end
```

```
x = xy(:,1);  
y = xy(:,2);  
figure(1)  
scatter(x,y, 'fill')  
set(gca, 'YGrid', 'on', 'XGrid', ...
```

```

'on', 'LineWidth', 2, 'fontsize', 20)
xlabel('\Delta V_{(n-1)} [V]')
ylabel('\Delta V_{(n)} [V]')

```

A.3.2 Tidsdifferanse

```

[tid, ladning, fase] = textread('dataexport.txt', ...
    '%f %f %f');

```

```

lengdexy = length(tid) - 2;

```

```

xy = zeros(lengdexy, 2);

```

```

for i = 1:lengdexy

```

```

    xy(i,1) = tid(i+1) - tid(i);
    xy(i,2) = tid(i+2) - tid(i+1);

```

```

end

```

```

x = xy(:,1);
y = xy(:,2);

```

```

figure(1)
scatter(x,y, 'fill')
set(gca, 'YGrid', 'on', 'XGrid', ...
'on', 'LineWidth', 2, 'fontsize', 20)
xlim([0 20])
ylim([0 20])
xlabel('\Delta t_{(n-1)} [s]')
ylabel('\Delta t_{(n)} [s]')

```

```

tiddiff = x;
tiddiff(29)

```

```

for j = 1:length(tiddiff)

```

```

    tiddiff(i) = round(tiddiff(i)*100)/100;

```

```

end

```

```
tiddiff(29)
unitiddiff = unique(tiddiff);
lengdetiddiff = length(tiddiff);

%figure(2)
%plot(sort(tiddiff), 'LineWidth', 5)
%xlim([0 lengdetiddiff])
%set(gca, 'YGrid', 'on', 'XGrid', ...
    'on', 'LineWidth', 2, 'fontSize', 20)
```

B Preparering av kabel

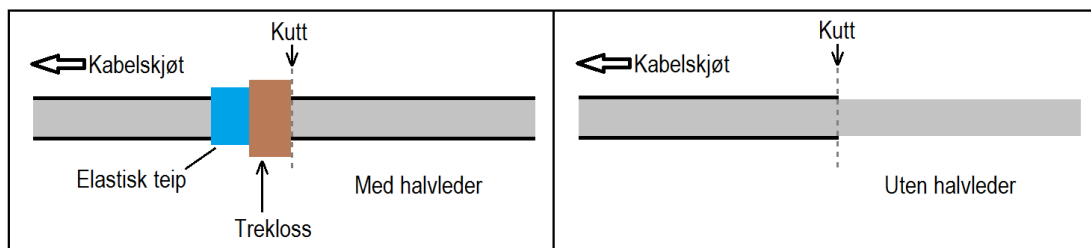
B.1 Terminering

For å lage termineringer til testobjektene i denne oppgaven brukes følgende oppskrift:

Det første som gjøres er å fjerne den ytre halvlederen et stykke inn på kabelen. Siden den ene kabelen har stripbar halvleder, og den andre ikke har det, må to forskjellige metoder brukes for å få den fjernet.

For å fjerne halvlederen som ikke er stripbar, brukes en skrellemaskin. I dette tilfellet er det viktig å ikke fjerne for mye av isolasjonsmaterialet, ved å kutte for dypt i kabelen. Dersom det oppstår ujevnheter i isolasjonen, i nærheten av overgangen til halvleder, pusses den glatt med ekstra fint sandpapir (P400). Den vaskes så ren med isopropanol.

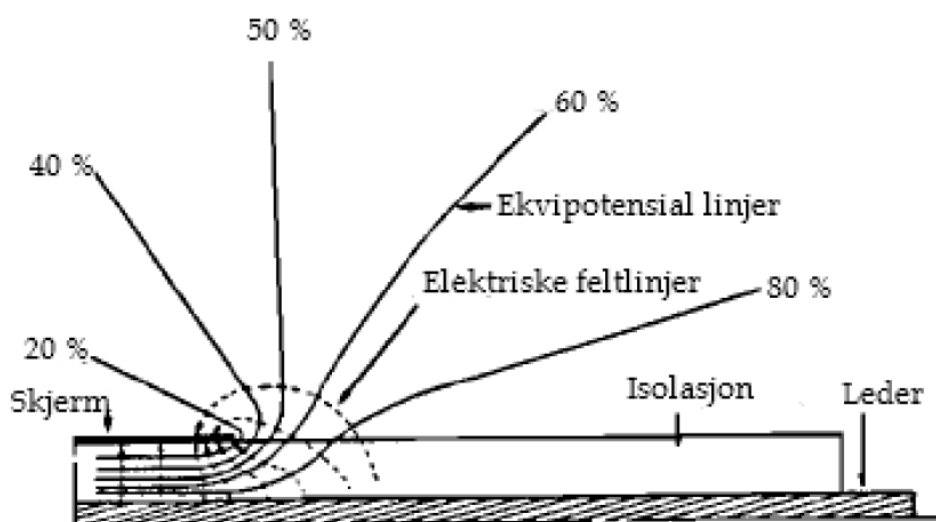
For å fjerne den stripbare halvlederen brukes annet utstyr. Ved hjelp av en speialkniv og en hul sylindrerformet trekloss lages det et kutt i halvlederen, som går nesten helt igjennom til isolasjonen. Treklossen tres innpå kabelen og fungerer som en brems for kniven. For å få klossen til å sitte helt fast, kan det surres litt elastisk isolerende teip på kabelen. Etter at kuttet har blitt laget, fjernes klossen og teipen. Halvlederen kan da rives av, ved å starte i enden hvor lederen er eksponert. Kuttet som har blitt laget vil da være et svakt punkt i halvlederen, og overgangen fra isolasjon til halvleder oppstår her.



Figur B.1: Fjerning av stripbar ytre halvleder. Venstre: Treklossen fungerer som brems, slik at halvlederen kan kuttes med et jevnt kutt. Elastisk isolerende teip brukes slik at treklossen sitter helt fast når det kuttes. Halvlederen dras så av, frem til kuttet. Høyre: Halvlederen har blitt fjernet.

I området hvor halvleder og isolasjon møtes, kan det oppstå en feltfordeling som vist i Figur B.2. Med en slik feltfordeling vil sannsynligheten for partielle utlad-

ninger være stor. Dette er fordi holdfastheten til luften rundt er lavere enn for isolasjonen, og partielle utladninger kan da oppstå ved relativt lave spenningsverdier.



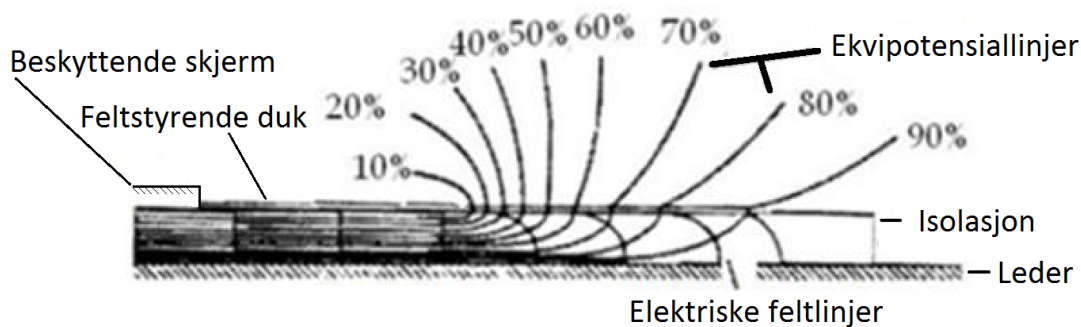
Figur B.2: Elektrisk feltfordistribusjon i overgang mellom halvleder og isolasjon, uten feltstyring. [3, s.6.1]

For å få en jevnere overgang fra halvleder til isolasjonen, påføres et tynt lag med halvledende lakk, ca. 5 mm inn på isolasjonen. Ved å bruke teip til å maskere, oppnås et rett skille rundt hele kabelen. Teipen fjernes når lakken har tørket.

Deretter legges det på en feltstyring duk i overgangen mellom isolasjon og halvleder. Denne går ca. 2 cm inn på halvledersiden og ca. 8 cm inn på isolasjonen. Denne duken presses godt på, slik at det ikke oppstår noe hulrom mellom den og kabelen.

Utenpå den feltstyring duken surres det seks lag med elastisk isolerende teip, hvor teipen begynner og slutter på halvledersiden. Denne har som oppgave å stramme på den feltstyring duken, slik at eventuelle hulrom blir tettet igjen.

Ved å følge denne oppskriften, vil feltfordelingen være mer som den i Figur B.3. Og dersom arbeidet er skikkelig utført, skal det ikke kunne oppstå utladninger i termineringen, ved spenninger brukt under måling.



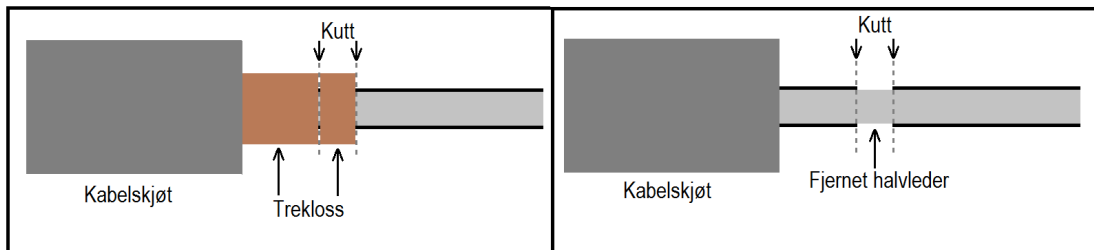
Figur B.3: Elektrisk feltdistribusjon i overgang mellom halvleder og isolasjon, med feltstyring. [3, s.6.6]

B.2 Guard

For å skille skjøten fra resten av testobjektet, lages det en guard på hver side av skjøten. Som for termineringene, brukes det også her to forskjellige metoder, siden den ene kablen har stripbar halvleder mens den andre ikke har det.

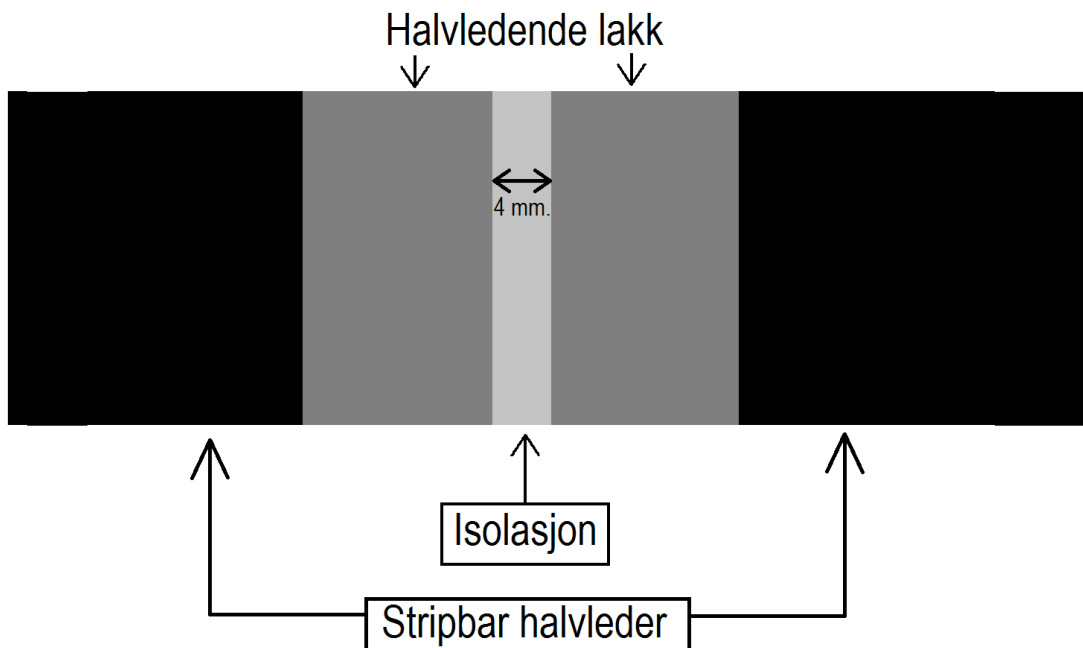
For kablen som ikke har stripbar halvleder brukes en fil til å file et hakk i halvlederen som er ca. 4 mm bredt. For å få så nøyaktige målinger som mulig bør hakket være tettest mulig skjøten. Samtidig er det viktig at det er plass nok til å montere resten av materialene som kreves for å lage en guard. Det er viktig å prøve å fjerne så lite av isolasjonen som mulig, når ytre halvleder files bort. Isolasjonen pusses glatt med ekstra fint sandpapir (P400), når hakket har blitt filt.

For den stripbare halvlederen brukes samme utstyr som for termineringene. Men i stedet for elastisk teip brukes selve skjøten som brems for treklossen. I tillegg brukes det en ekstra treklosse. Først skjæres det et hakk, ved hjelp av den første treklossen, som er ca. 5 cm lang. Deretter tres den andre treklossen, som er ca. 3 cm lang, utenpå den første. Det skjæres så et nytt hakk i den ytre halvleder, slik at det er to hakk, med avstand 3 cm mellom seg. Halvlederen mellom disse to hakkene fjernes så ved hjelp av en vanlig kniv.



Figur B.4: For å lage guard i den stripbare halvlederen brukes en spesialkniv for å lage to kutt i halvlederen. Halvlederen fjernes så i området mellom de to kuttene. For å markere hvor kuttene skal lages brukes to hule sylindrerformede treklosser, som tres innpå kableen.

For å få et 4 mm bredt område med isolasjon, også i hakket med stripbar halvleder, brukes halvledende lakk. Isolerende teip brukes for å maskere. Det lakkerte området er ca. like stort på begge sider av området med isolasjon, som vist i Figur B.5.

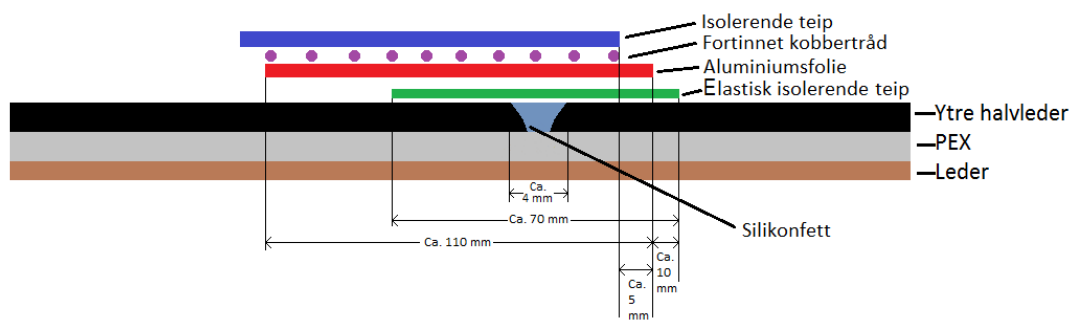


Figur B.5: Den stripbare halvlederen fjernes i et lite område for å lage guard. Området med isolasjon lakkres med halvledende lakk, slik at det blir et ca. 4 mm bredt bånd, midt i området med isolasjon.

For å unngå hulrom i hakket, fylles det med silikonfett. Dette gjøres for begge kabeldelene. Deretter legges det på fire lag med elastisk isolerende teip, som er ca 7 cm bred, og går like langt ut på begge sidene av hakket.

For å forhindre feltforsterkning rundt hakket i halvlederen legges det på et lag med aluminiumsfolie utenpå den elastiske teipen. Denne folien legges ca. én cm inn på teipen, på kabelskjøtsiden. På termineringssiden legges folien godt innpå halvlederen.

Utenpå aluminiumsfolien surres fortinnet kobbertråd, for å holde folien på plass. For å beskytte garden legges det til slutt på et lag med isolerende teip. Men på kabelskjøtsiden teipes det ikke over den siste halve centimeteren med aluminiumsfolie, siden dette senere brukes som et tilkoblingspunkt.

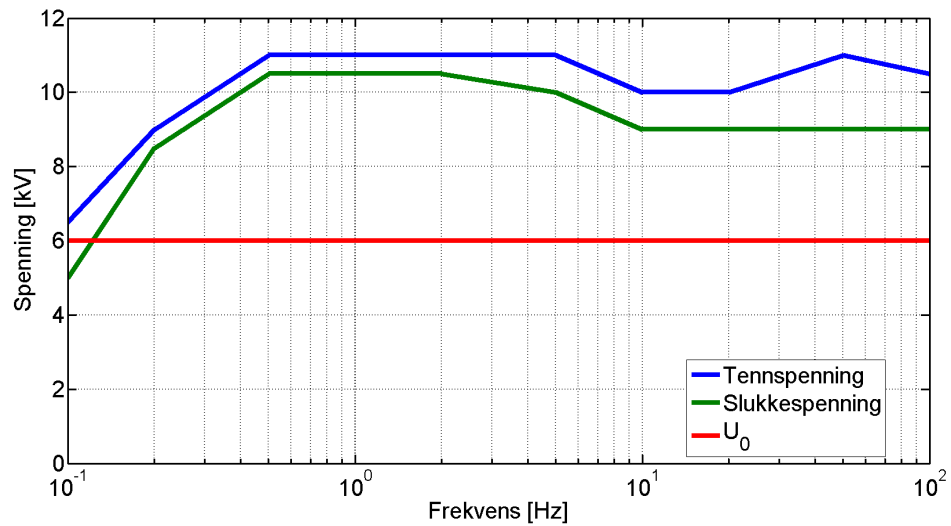


Figur B.6: Skisse av oppbygging av guard.

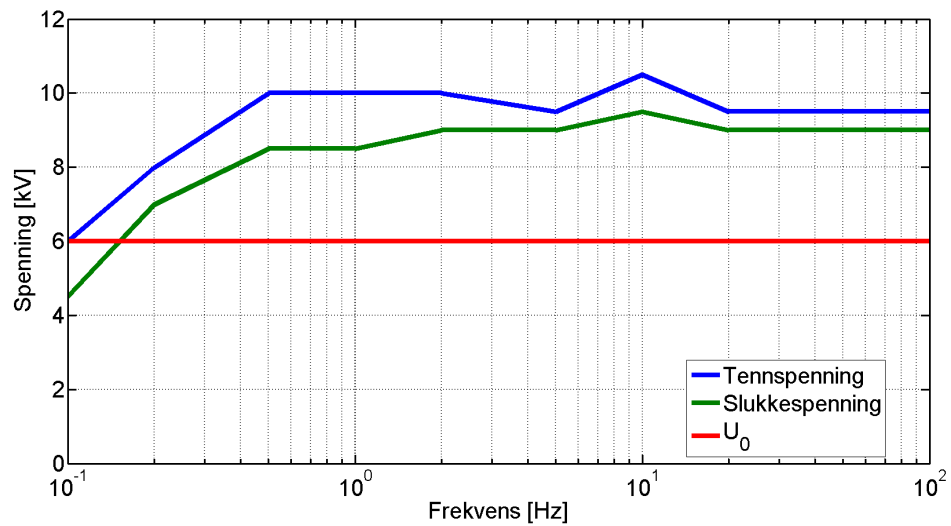
C PD-målinger

C.1 Tennspenningstest

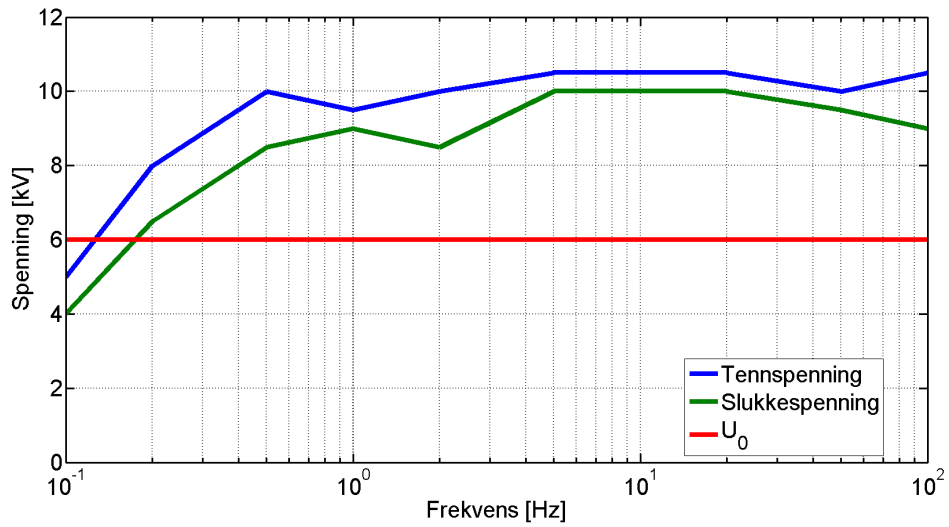
C.1.1 Frekvensavhengig Tennspenning



Figur C.1: Tenn- og slukkespenning for Kabelskjøt A.

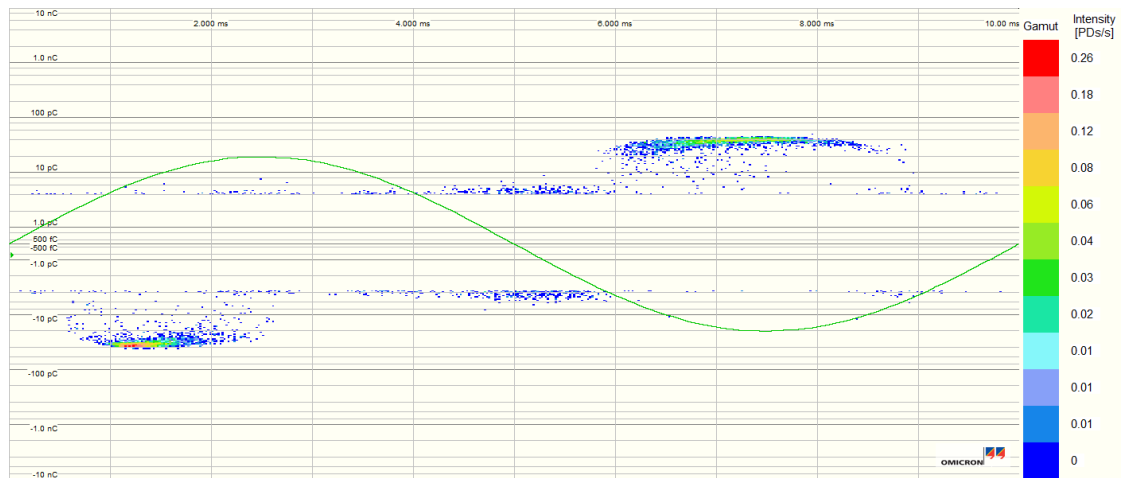


Figur C.2: Tenn- og slukkespenning for Kabelskjøt B.

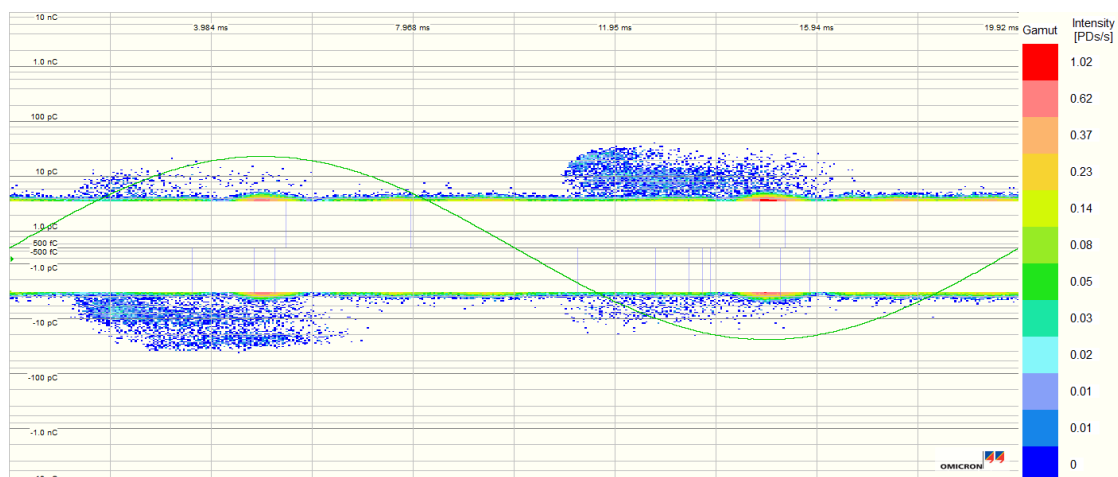


Figur C.3: Tenn- og slukkespenning for Kabelskjøt C.

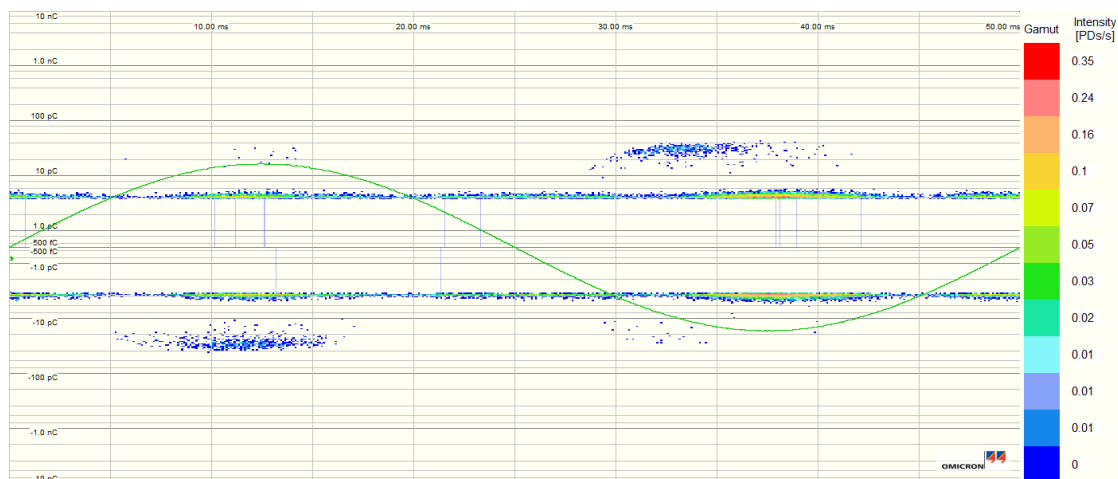
C.1.2 Utladninger ved tenning under tennspenningstesten, i Kabelskjøt A



Figur C.4: Utladninger i Kabelskjøt A, når tennspenning (10,5 kV) er oppnådd ved 100 Hz. Støynivået er på 3,8 pC.



Figur C.5: Utladninger i Kabelskjøt A, når tennspenning (11,0 kV) er oppnådd ved 50,2 Hz. Støynivået er på 4,0 pC.



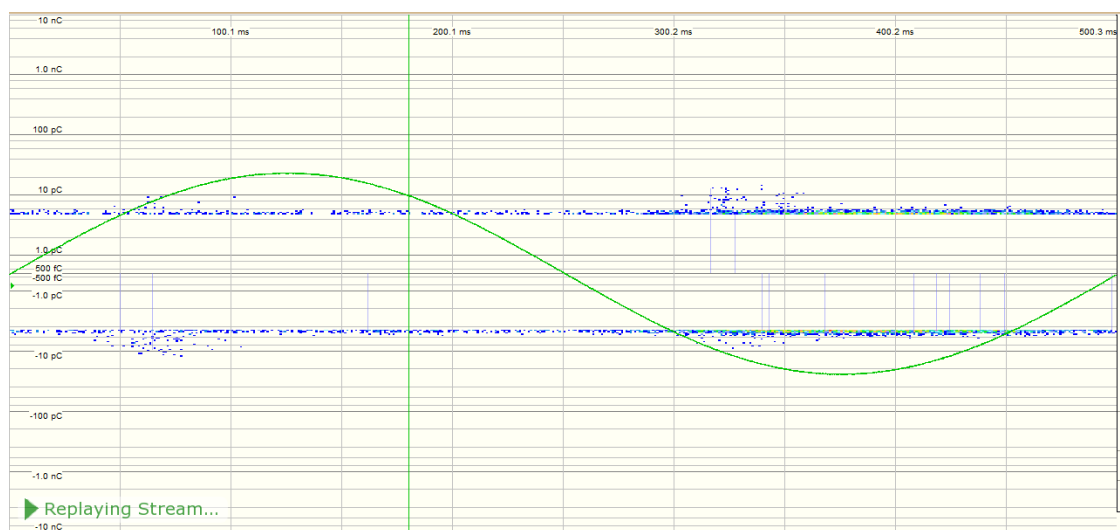
Figur C.6: Utladninger i Kabelskjøt A, når tennspenning (10,0 kV) er oppnådd ved 20 Hz. Støynivået er på 3,7 pC.



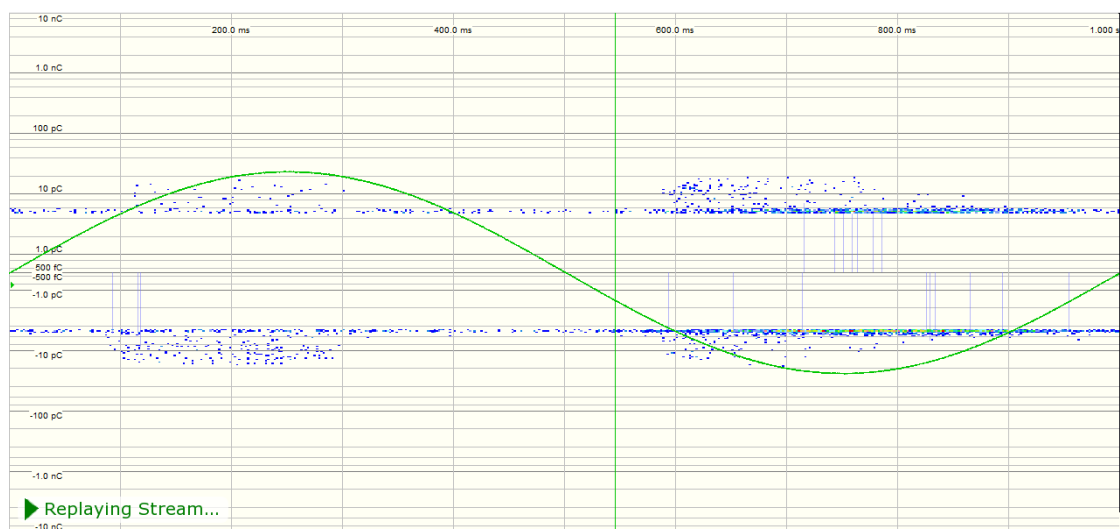
Figur C.7: Utladninger i Kabelskjøt A, når tennspenning (10,0 kV) er oppnådd ved 10 Hz. Støynivået er på 4,4 pC.



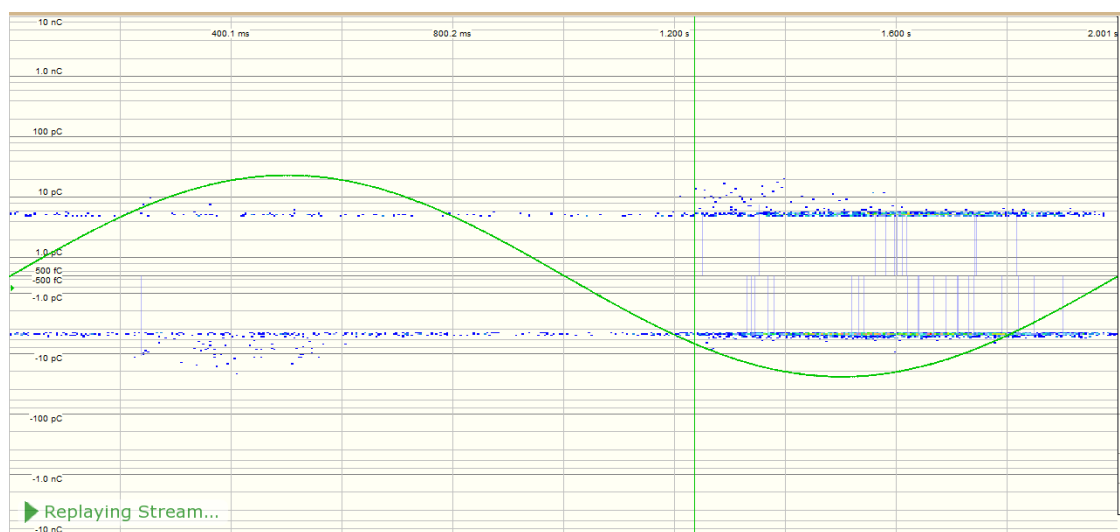
Figur C.8: Utladninger i Kabelskjøt A, når tennspenning (11,0 kV) er oppnådd ved 5 Hz. Støynivået er på 4,6 pC.



Figur C.9: Utladninger i Kabelskjøt A, når tennspenning (11,0 kV) er oppnådd ved 2 Hz. Støynivået er på 4,6 pC.



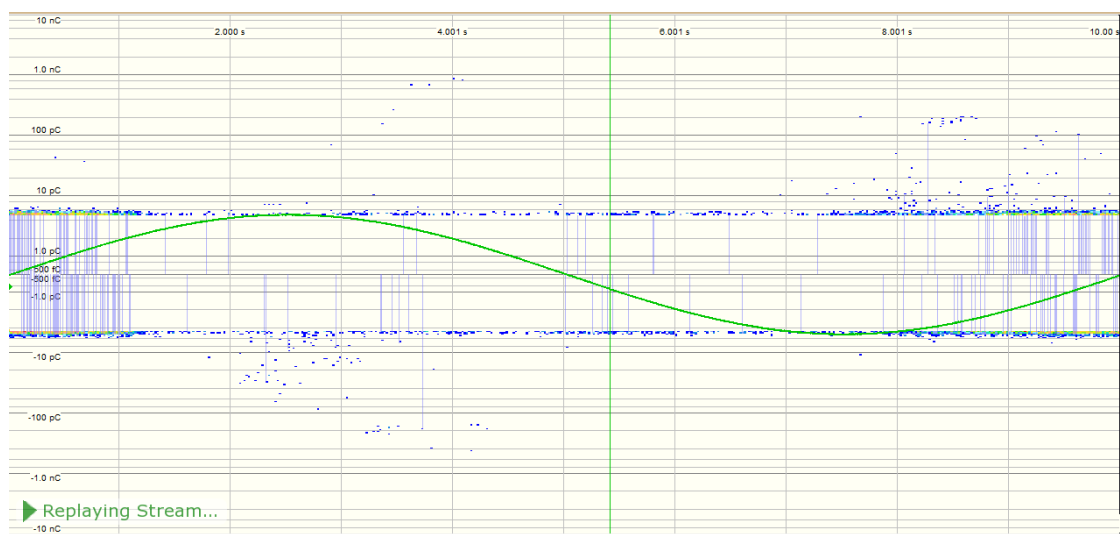
Figur C.10: Utladninger i Kabelskjøt A, når tennspenning (11,0 kV) er oppnådd ved 1 Hz. Støynivået er på 4,7 pC.



Figur C.11: Utladninger i Kabelskjøt A, når tennspenning (11,0 kV) er oppnådd ved 0,5 Hz. Støynivået er på 4,7 pC.

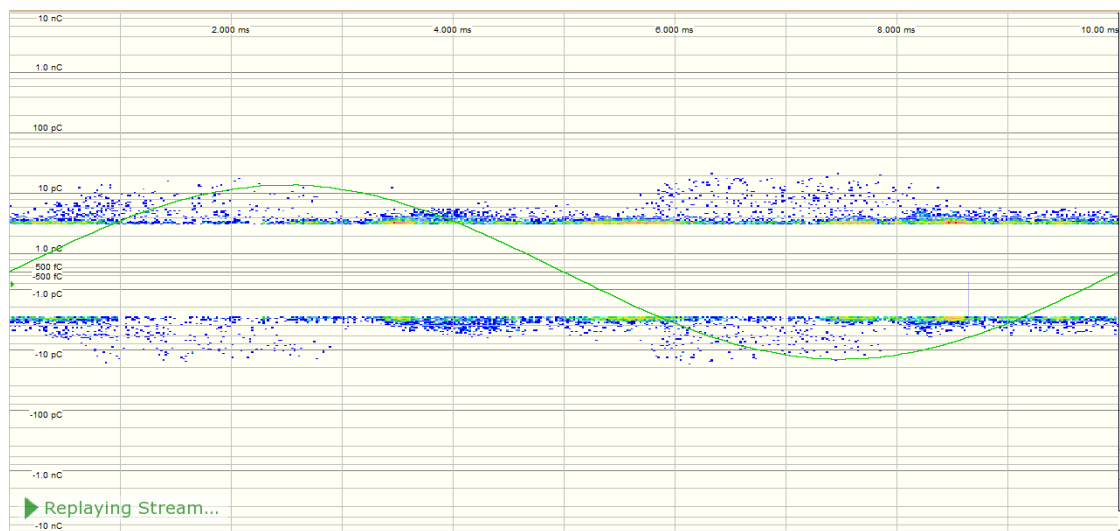


Figur C.12: Utladninger i Kabelskjøt A, når tennspenning (9,0 kV) er oppnådd ved 0,2 Hz. Støynivået er på 4,7 pC.

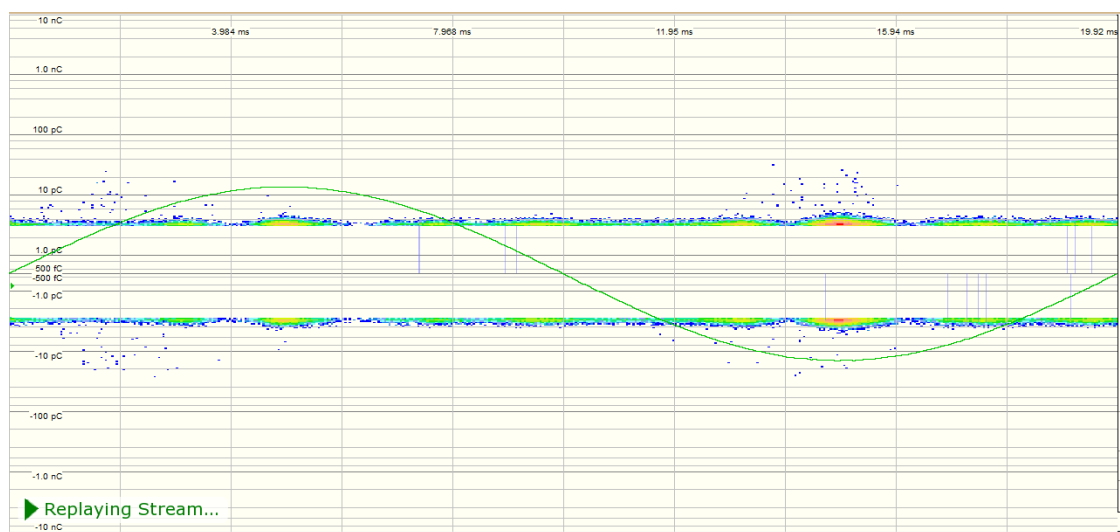


Figur C.13: Utladninger i Kabelskjøt A, når tennspenning (6,5 kV) er oppnådd ved 0,1 Hz. Støynivået er på 4,6 pC.

C.1.3 Utladninger ved tenning under tennspenningstesten, i Kabelskjøt B



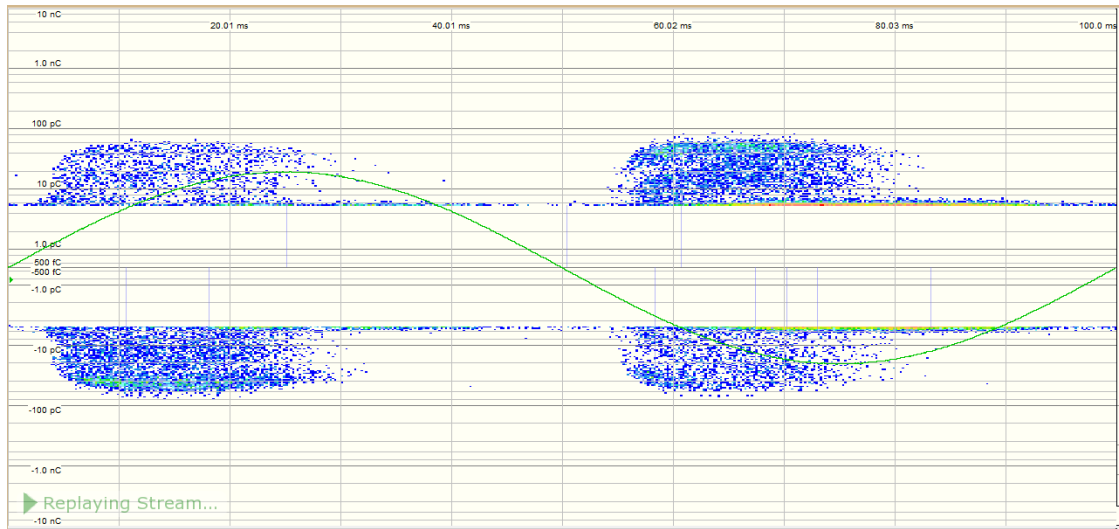
Figur C.14: Utladninger i Kabelskjøt B, når tennspenning (9,5 kV) er oppnådd ved 100 Hz. Støynivået er på 3,0 pC.



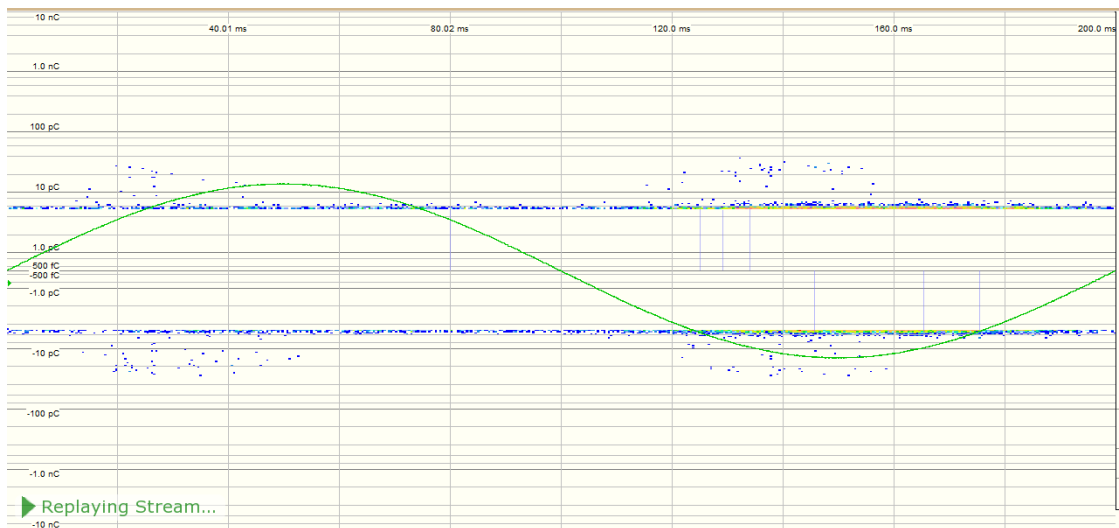
Figur C.15: Utladninger i Kabelskjøt B, når tennspenning (9,5 kV) er oppnådd ved 50,2 Hz. Støynivået er på 3,0 pC.



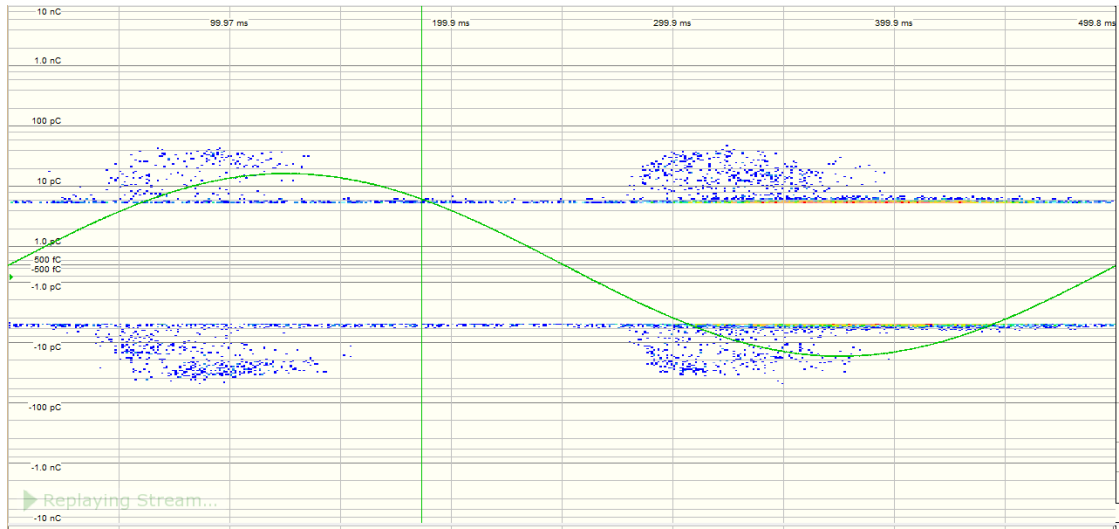
Figur C.16: Utladninger i Kabelskjøt B, når tennspenning (9,5 kV) er oppnådd ved 20 Hz. Støynivået er på 4,0 pC.



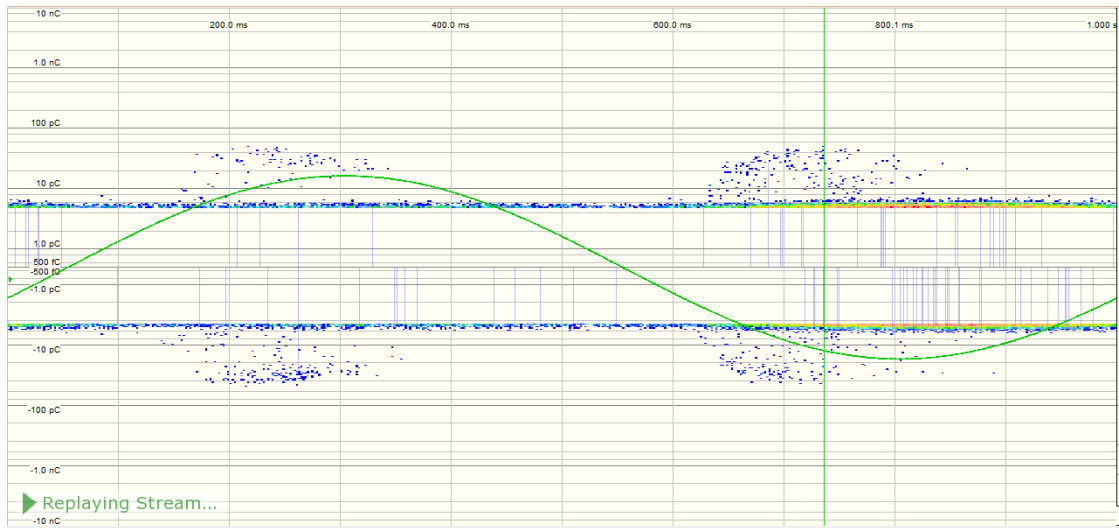
Figur C.17: Utladninger i Kabelskjøt B, når tennspenning (10,5 kV) er oppnådd ved 10 Hz. Støynivået er på 5,0 pC.



Figur C.18: Utladninger i Kabelskjøt B, når tennspenning (9,5 kV) er oppnådd ved 5 Hz. Støynivået er på 5,0 pC.



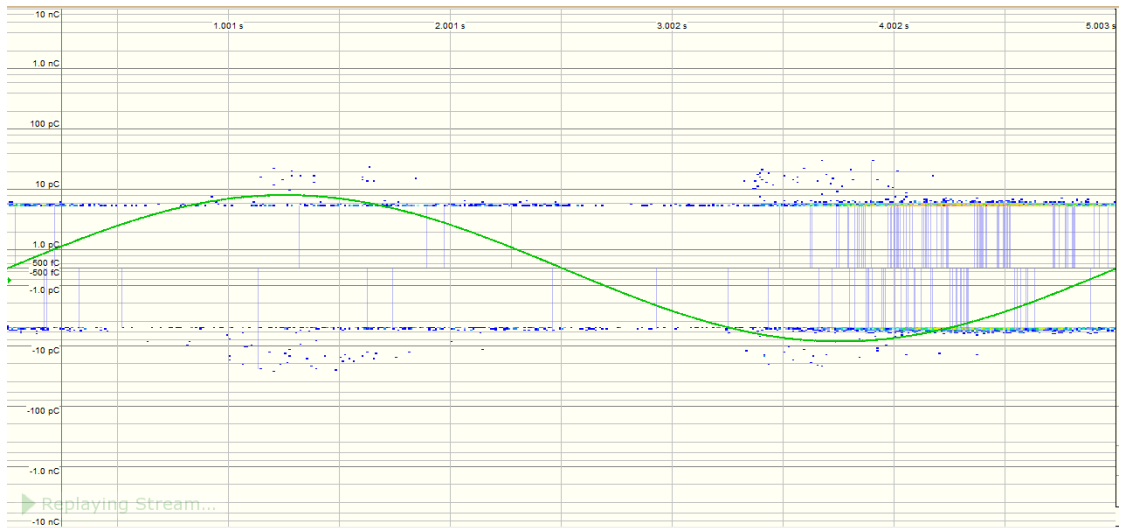
Figur C.19: Utladninger i Kabelskjøt B, når tennspenning (10,0 kV) er oppnådd ved 2 Hz. Støynivået er på 5,0 pC.



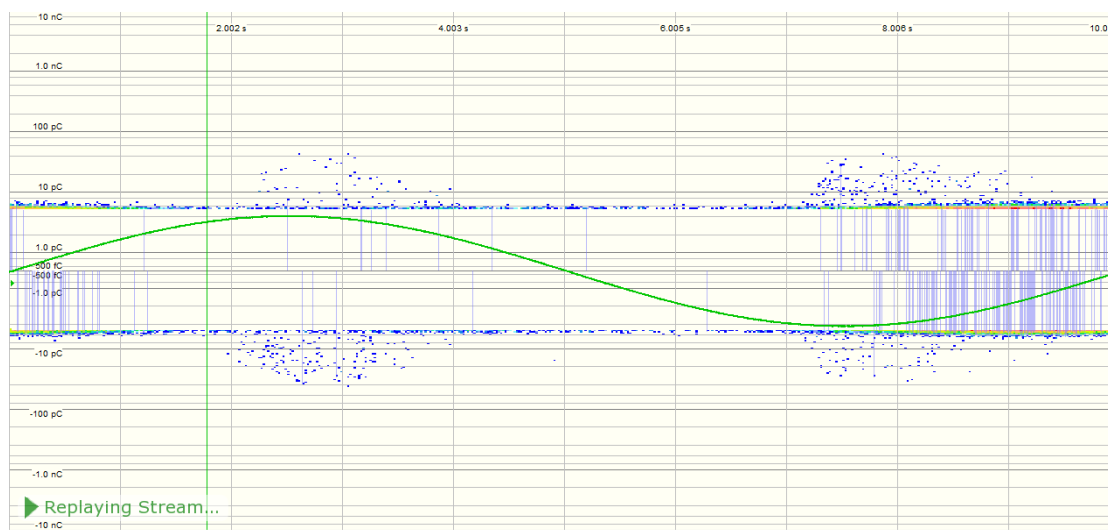
Figur C.20: Utladninger i Kabelskjøt B, når tennspenning (10,0 kV) er oppnådd ved 1 Hz. Støynivået er på 4,6 pC.



Figur C.21: Utladninger i Kabelskjøt B, når tennspenning (10,0 kV) er oppnådd ved 0,5 Hz. Støynivået er på 5,0 pC.

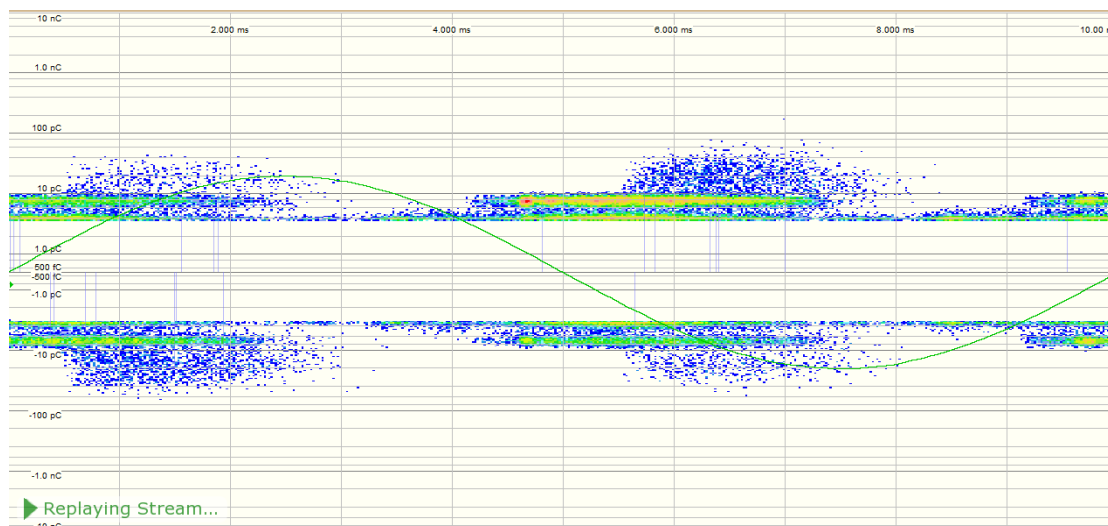


Figur C.22: Utladninger i Kabelskjøt B, når tennspenning (8,0 kV) er oppnådd ved 0,2 Hz. Støynivået er på 5,0 pC.



Figur C.23: Utladninger i Kabelskjøt B, når tennspenning (6,0 kV) er oppnådd ved 0,1 Hz. Støynivået er på 5,0 pC. Målingen har her blitt gjort i 10 minutter, i stedet for 4. Dette er for å få et tydeligere svar på om det er tennspenning som har blitt oppnådd.

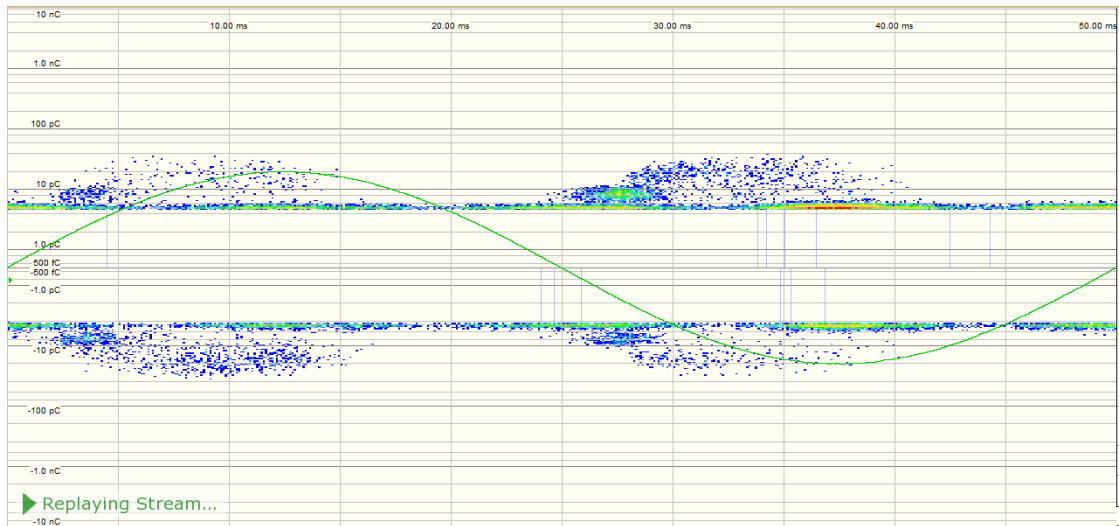
C.1.4 Utladninger ved tenning under tennspenningstesten, i Kabelskjøt C



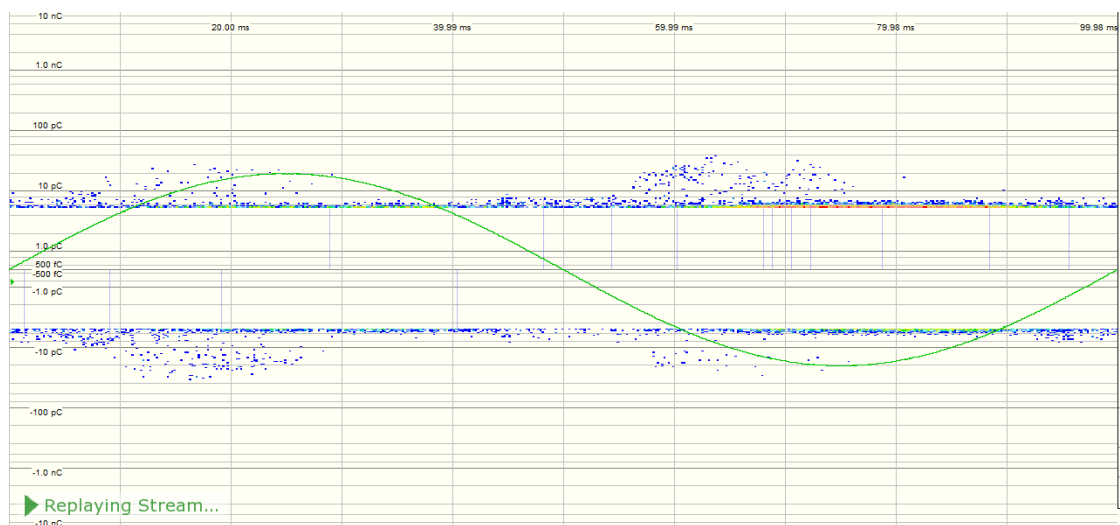
Figur C.24: Utladninger i Kabelskjøt C, når tennspenning (10,5 kV) er oppnådd ved 100 Hz. Støynivået er på 3,5 pC.



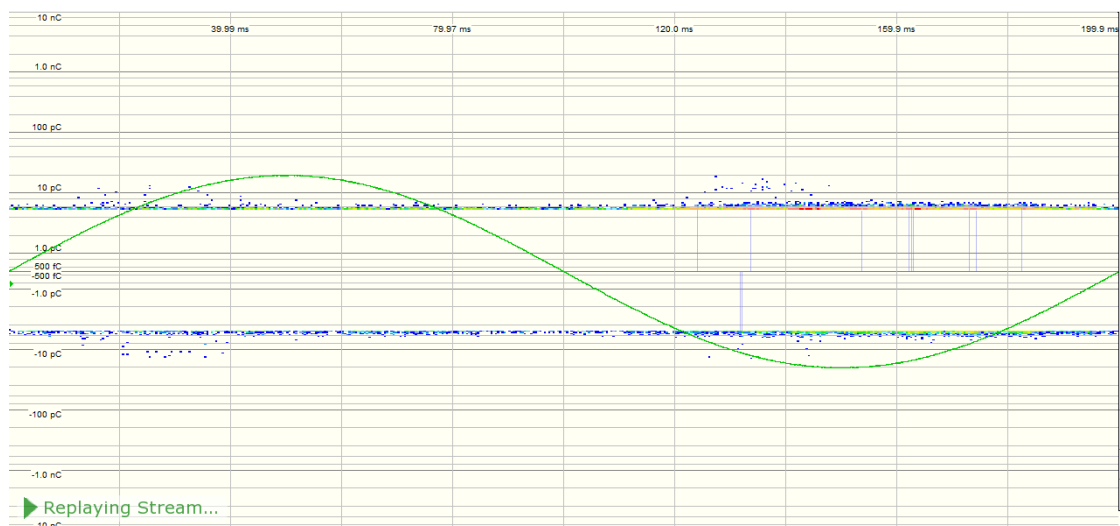
Figur C.25: Utladninger i Kabelskjøt C, når tennspenning (10,0 kV) er oppnådd ved 50,2 Hz. Støynivået er på 4,0 pC.



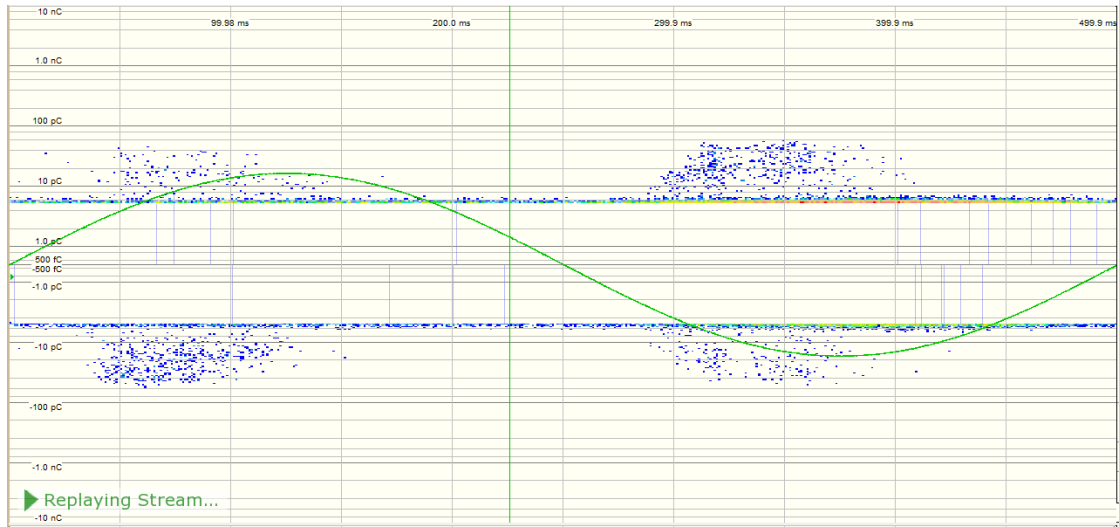
Figur C.26: Utladninger i Kabelskjøt C, når tennspenning (10,5 kV) er oppnådd ved 20 Hz. Støynivået er på 4,5 pC.



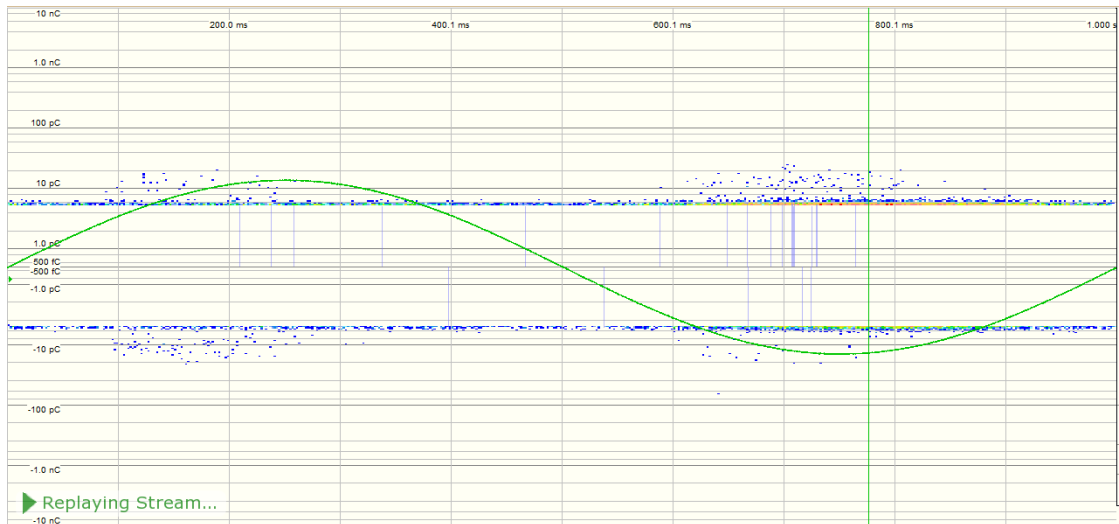
Figur C.27: Utladninger i Kabelskjøt C, når tennspenning (10,5 kV) er oppnådd ved 10 Hz. Støynivået er på 5,0 pC.



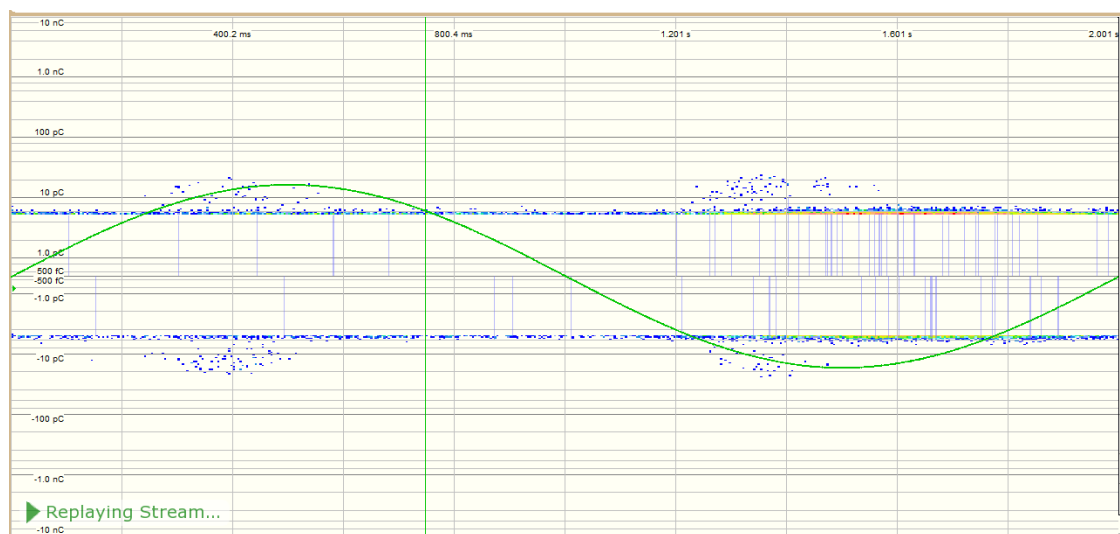
Figur C.28: Utladninger i Kabelskjøt C, når tennspenning (10,5 kV) er oppnådd ved 5 Hz. Støynivået er på 5,0 pC.



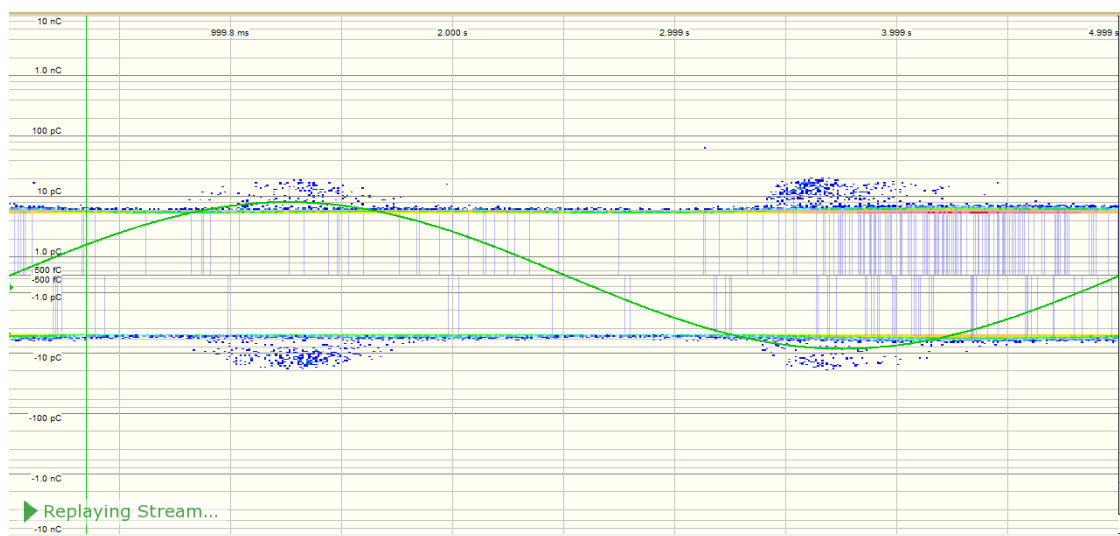
Figur C.29: Utladninger i Kabelskjøt C, når tennspenning (10,0 kV) er oppnådd ved 2 Hz. Støynivået er på 5,0 pC.



Figur C.30: Utladninger i Kabelskjøt C, når tennspenning (9,5 kV) er oppnådd ved 1 Hz. Støynivået er på 5,0 pC.



Figur C.31: Utladninger i Kabelskjøt C, når tennspenning (10,0 kV) er oppnådd ved 0,5 Hz. Støynivået er på 5,0 pC.



Figur C.32: Utladninger i Kabelskjøt C, når tennspenning (8,0 kV) er oppnådd ved 0,2 Hz. Støynivået er på 5,0 pC.



Figur C.33: Utladninger i Kabelskjøt C, når tennspenning (5,0 kV) er oppnådd ved 0,1 Hz. Støynivået er på 5,0 pC.

C.2 600 perioder, PRPDA-plot

C.2.1 600 Perioder, Kabelskjøt A

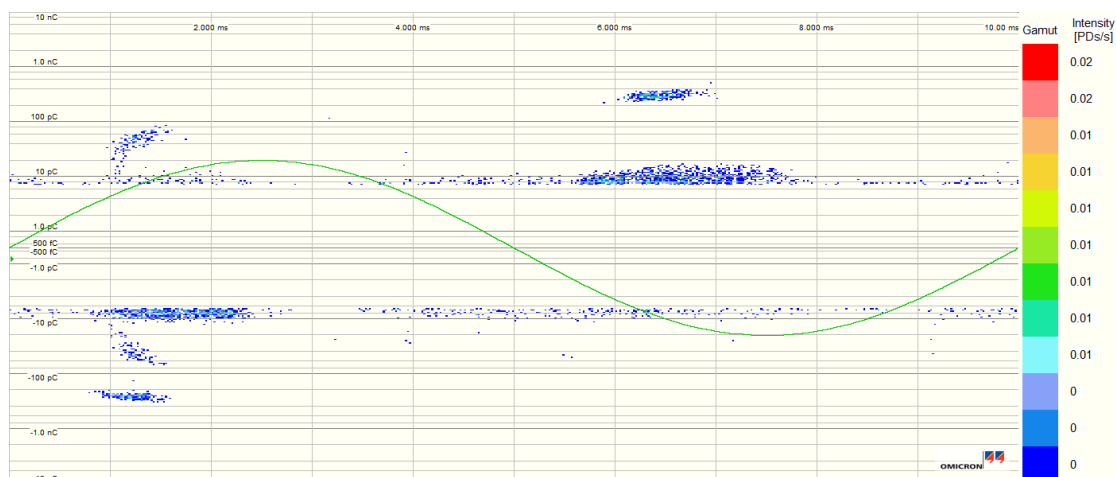
600 Perioder, Kabelskjøt A, 100 Hz

For Kabelskjøt A har tennspenningen blitt målt til å være 10,5 kV, når spenningsfrekvensen er 100 Hz (FigurC.1). Den samme tennspenningen finnes under målingen av 600 tilfeldige perioder. Det måles i 5 minutter, før 600 tilfeldige perioder hentes ut, ved hjelp av Matlab. Støynivået under målesekvensen settes til 4 pC, som betyr at ingen utladninger som er mindre enn dette vil bli registrert. Resultatet for hele målesekvensen (5 min.) vises i Figur C.34.



Figur C.34: Utladninger i Kabelskjøt A, under måling gjort ved 100 Hz og 10,5 kV. Målingen utføres i fem minutter, og har en støygrense på 4 pC. 600 tilfeldige perioder velges senere ut, ved hjelp av Matlab, for å kunne sammenligne med målinger gjort ved andre frekvenser. Støygrensen er her for lav, og justeres derfor som vist i FigurC.35.

Det vises tydelig i Figur C.34 at det fremdeles er en del støy som registreres, når støynivået er 4 pC. Samme målingen spilles derfor av på ny, hvor støynivået har blitt endret til 7 pC. Dette vises i Figur C.35.



Figur C.35: Utladninger i Kabelskjøt A, under måling gjort ved 100 Hz og 10,5 kV. Dette er samme måling som i Figur C.34, bare med en støygrense på 7 pC i stedet for 4 pC.

I Figur C.35 kan det fremdeles registreres bakgrunnsstøy. Men om støygrensen økes, vil målinger som antas å være PD, gå tapt. I den negative halvperioden er det to samlinger av utladninger. Den ene ligger i området 7 til 20 pC, mens den andre ligger i området 200 - 300 pC. I tillegg er det en del, som antas å være støy, som registreres over hele halvperioden. Dersom dette skal filtreres ut, vil mange av de antatte utladningene mellom 7 og 20 pC også bli filtrert bort.

I den positive halvperioden er det fire samlinger av utladninger, hvor tre av de består av negative utladninger. Utladningene som ligger mellom -7 pC og -10 pC vil også filtreres bort, dersom støygrensen økes ytterligere. Dette er noe som blir tatt med i betraktningen når utladningsdataen skal behandles senere i oppgaven.

For å filtrere bort det resterende, som antas å være støy, fjernes alle utladninger som har faseverdi utenfor intervallene 30 - 108 og 200 - 288 grader. Dette gjøres i Matlab.

600 Perioder, Kabelskjøt A, 50,2 Hz

Målingen gjort ved 50,2 Hz behandles på samme måten som ved 100 Hz. Støynivået settes til å være 6 pC, og vises i Figur C.36. Dette ser ut til å være tilstrekkelig til å filtrere bort det som er av bakgrunnsstøy.

Ved 50,2 Hz er det kun fire områder hvor det registreres utladninger. Positive utladninger i negativ halvperiode, og negative utladninger i positiv halvperiode ser

ut til å være de mest vanlige for denne målingen. Det registreres ingen utladninger som har en absoluttverdi høyere enn 20 pC.



Figur C.36: Utladninger i Kabelskjøt A, under måling gjort ved 50,2 Hz og 11,0 kV. Figuren viser en målesekvens på 5 minutter, hvor støynivået er 6 pC. 600 tilfeldige perioder velges senere ut fra denne målesekvensen, for å kunne sammenligne verdiene med målinger gjort ved andre frekvenser.

600 Perioder, Kabelskjøt A, 0,2 Hz

Målingen gjort ved 0,2 Hz pågår i 50 minutter, slik at det måles over 600 perioder. Dette betyr at hele målesekvensen brukes i sammenligningen med de andre frekvensene. For å få fjernet all bakgrunnsstøy, benyttes en støygrense på 8,0 pC.

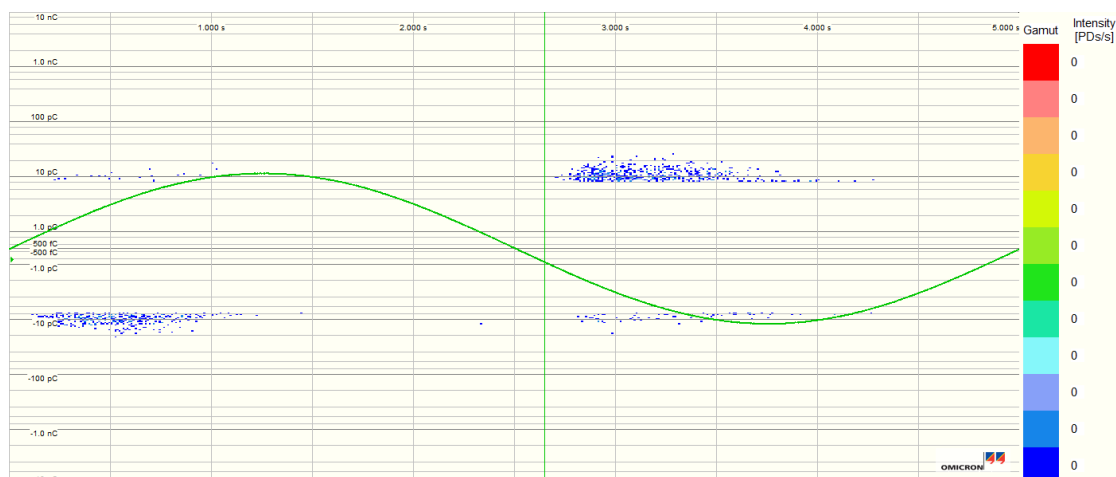
For denne målingen er det hovedsakelig to samlinger av utladninger, med en i hver halvperiode, som vist i Figur C.37.



Figur C.37: Utladninger i Kabelskjøt A, under måling gjort ved 0,2 Hz og 9,0 kV. Figuren viser en målesekvens på 50 minutter, hvor støynivået er 8 pC. 50 minutter ved 0,2 Hz tilsvarer 600 perioder, som kan sammenlignes med de andre frekvensene det måles ved.

På grunn av kapasitive egenskaper i målekretsen, oppstår det en faseforskyvning av utladningene ved de laveste frekvensene. Metoden som brukes for å justere dette finnes i Vedlegg E. For Kabelskjøt A, ved 0,2 Hz, er det en faseforskyvning på 44,6 grader mot høyre, som vist i Tabell E.3.

Figur C.38 viser at utladningene ved 0,2 Hz oppstår i samme faseområdet som ved 50,2 og 100 Hz, når faseforskyvningen tas med i betraktning.

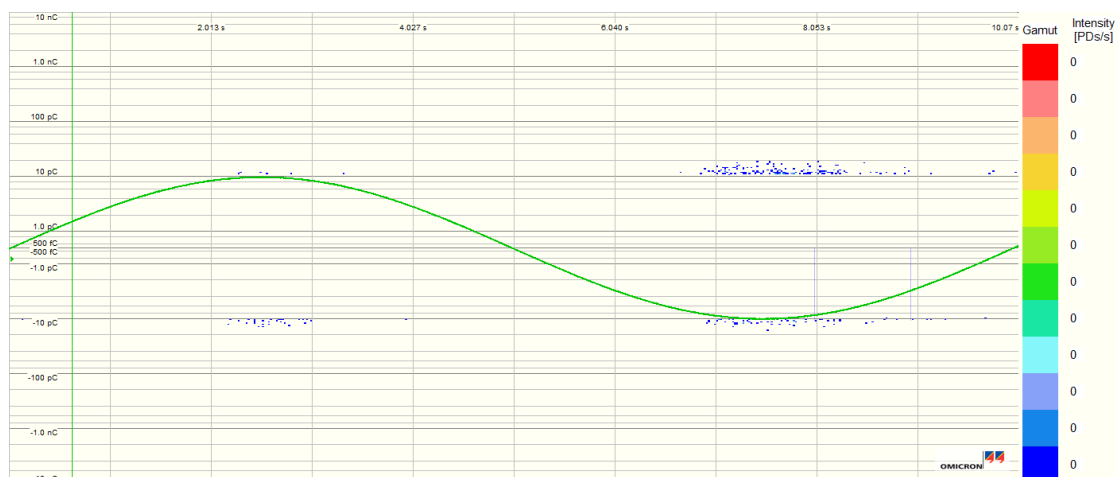


Figur C.38: Utladninger i Kabelskjøt A, under måling gjort ved 0,2 Hz og 9,0 kV. Figuren viser det samme som Figur C.37, bare med en faseforskyvning på 44,6 grader mot venstre. Dette er på grunn av de kapasitive egenskapene til målekretsen, som gir en forskyvning av utladningene ved lave frekvenser.

600 Perioder, Kabelskjøt A, 0,1 Hz

Ifølge tennspenningstesten skal det oppstå utladninger i Kabelskjøt A, når den påtrykte spenningen er 6,5 kV, og frekvensen 0,1 Hz (Figur C.1). Når målingen gjøres igjen, for å finne utladningsaktiviteten for 600 perioder, oppstår det ikke utladninger før den påtrykte spenningen er 8,5 kV. For å filtrere bort alt av bakgrunnsstøy, brukes en støygrense på 10,5 pC.

For at det skal oppstå utladninger i et testobjekt er det to krav som må oppfylles. For det første må det være et sterkt nok elektrisk felt for å kunne starte et elektronskred. I tillegg må det være et startelektron til stede, for å starte hele prosessen. Fravær av ett eller begge disse kriteriene, har gjort at det ikke har oppstått utladninger ved 6,5 kV. Siden dette er et stokastisk tilfelle, kan tennspenningen variere fra forsøk til forsøk.



Figur C.39: Utladninger i Kabelskjøt A, under måling gjort ved 0,1 Hz og 8,5 kV. Målingen utføres i 100 minutter, og har en støygrense på 10,5 pC. 100 minutter ved 0,1 Hz tilsvarer 600 perioder, som kan sammenlignes med de andre frekvensene det måles ved.

Det er også en faseforskyvning i målingen gjort ved 0,1 Hz. For Kabelskjøt A, ved 0,1 Hz, er det en faseforskyvning på 69,8 grader mot høyre, i forhold til målingen gjort ved 100 Hz. Denne verdien finnes i Tabell E.3.



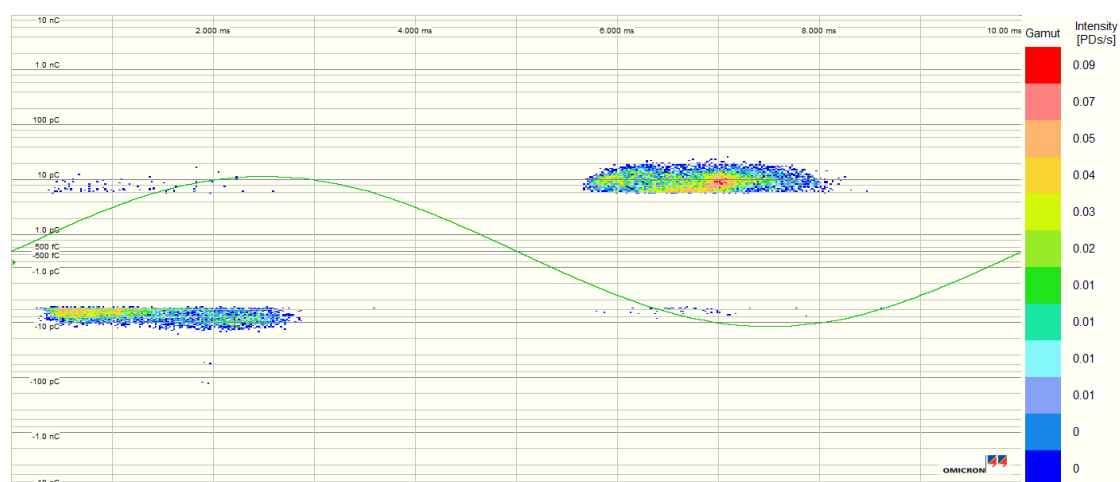
Figur C.40: Utladninger i Kabelskjøt A, under måling gjort ved 0,1 Hz og 8,5 kV. Figuren viser det samme som Figur C.39, bare med en faseforskyvning på 69,8 grader mot venstre. Dette er på grunn av de kapasitive egenskapene til målekretsen, som gir en forskyvning av utladningene ved lave frekvenser.

C.2.2 600 Perioder, Kabelskjøt B

600 Perioder, Kabelskjøt B, 100 Hz

For Kabelskjøt B gjennomføres det en målesekvens på 5 minutter ved 100 Hz. Spenningsnivået er 9 kV, selv om tennspenningen tidligere har blitt målt til å være 9,5 kV.

Når tennspenningen måles kan det være vanskelig å definere nøyaktig ved hvilken spenningsverdi dette skjer. Det er derfor mulig at tennspenningen ved 100 Hz er 9 kV, men at den ikke har blitt definert som det, siden målingene har vært vanskelig å tolke.



Figur C.41: Utladninger i Kabelskjøt B, under måling gjort ved 100 Hz og 9,0 kV. Målingen utføres i fem minutter, og har en støygrense på 5,5 pC. 600 tilfeldige perioder velges senere ut, ved hjelp av Matlab, for å kunne sammenligne med målinger gjort ved andre frekvenser.

600 Perioder, Kabelskjøt B, 50,2 Hz

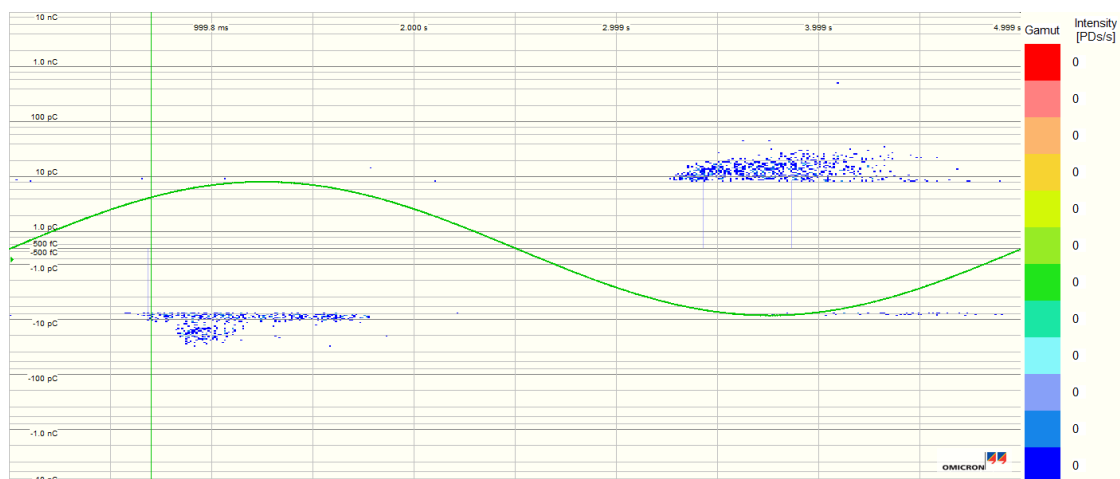
Målingen utført ved 50,2 Hz, for Kabelskjøt B, viser det samme som ved 100 Hz. Når tennspenning måles, registreres det tenning ved 9,5 kV, mens når det måles for å finne 600 tilfeldige perioder, registreres det utladninger ved 9,0 kV. Det er også her sannsynlig at det kan ha oppstått tenning ved et lavere spenningsnivå enn antatt, under tennspenningstesten.



Figur C.42: Utladninger i Kabelskjøt B, under måling gjort ved 50,2 Hz og 9,0 kV. Målingen utføres i fem minutter, og har en støygrense på 6,5 pC. 600 tilfeldige perioder velges senere ut, ved hjelp av Matlab, for å kunne sammenligne med målinger gjort ved andre frekvenser.

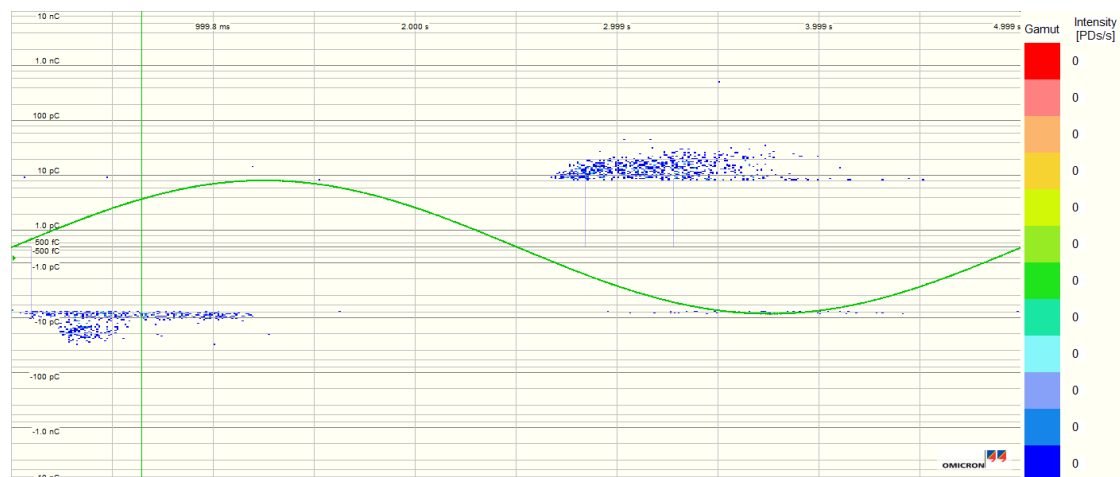
600 Perioder, Kabelskjøt B, 0,2 Hz

Ved 0,2 Hz registreres det utladninger når den påtrykte spenningen er 8,0 kV. Dette er den samme spenningsverdien som ved tennspenningstesten. Støynivået settes til 8,0 pC, for å filtrere bort alt av bakgrunnsstøy.



Figur C.43: Utladninger i Kabelskjøt B, under måling gjort ved 0,2 Hz og 8,0 kV. Målingen utføres i 50 minutter, og har en støygrense på 8,0 pC. 50 minutter ved 0,2 Hz tilsvarer 600 perioder, som kan sammenlignes med de andre frekvensene det måles ved.

Faseforskyvningen som oppstår når det måles ved 0,2 Hz, i Kabelskjøt B, er 42,4 grader mot høyre, som vist i Tabell E.3. For å endre dette, i målingen gjort over 600 perioder, følges oppskriften i Vedlegg E. Resultatet vises i Figur C.44.



Figur C.44: Utladninger i Kabelskjøt B, under måling gjort ved 0,2 Hz og 8,0 kV. Med å kompensere for faseforskyvningen som oppstår under måling ved 0,2 Hz, for Kabelskjøt B, forskyves alle utladningene fra Figur C.43 42,4 grader mot venstre.

Etter å ha kompensert for faseforskyvningen ved 0,2 Hz, oppstår utladningene seg i samme faseområde som ved 100 og 50,2 Hz.

600 Perioder, Kabelskjøt B, 0,1 Hz

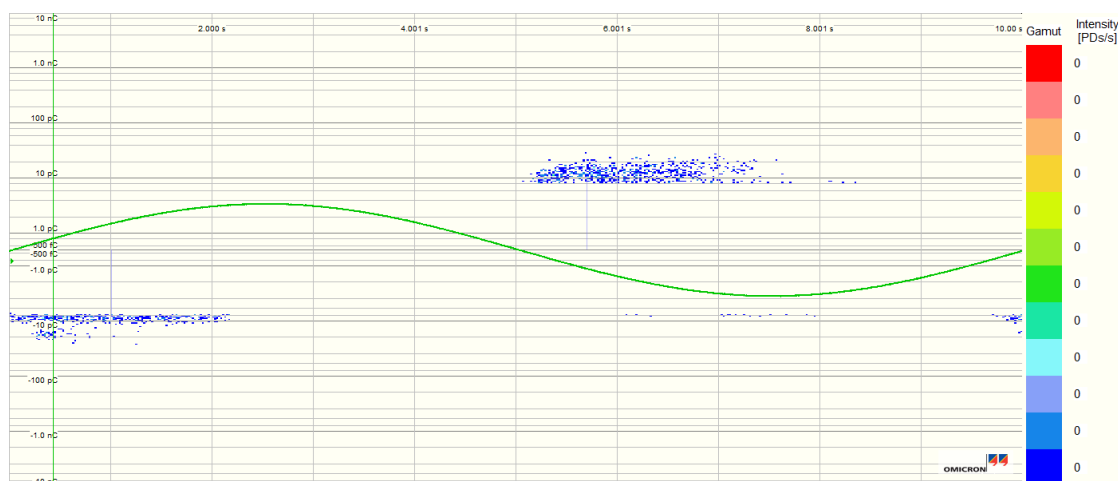
Målingen gjort ved 0,1 Hz, for Kabelskjøt B, utføres i 100 minutter. Dette tilsvarer 600 perioder, som gir mulighet til å sammenligne målingen gjort ved de tre andre frekvensene.

Målingen utføres ved 5,5 kV, som er 0,5 kV lavere enn den tidligere målte tennspenningen. Grunnen til dette kan være at det under tennspenningsmålingen ikke måles over en lang nok periode til å kunne registrere utladninger. Fire minutter, som er tidsintervallet under tennspenningstesten, tilsvarer 24 perioder ved 0,1 Hz. Til sammenligning med 100 Hz, så tilsvarer fire minutter 24000 perioder. Men selv om det kun måles over 24 perioder, viser det seg at tennspenningen, når det måles over 600 perioder, kun er 0,5 kV mindre enn tidligere målt. Dette er et avvik som kan forventes, og som derfor er akseptabelt.



Figur C.45: Utladninger i Kabelskjøt B, under måling gjort ved 0,1 Hz og 5,5 kV. Målingen utføres i 100 minutter, og har en støygrense på 8,0 pC. 100 minutter ved 0,1 Hz tilsvarer 600 perioder, som kan sammenlignes med de andre frekvensene det måles ved.

Som vist i Figur C.45, oppstår utladningene i faseområdet som ligger litt til høyre for spenningstoppene. Dette er en klar faseforskyvning i forhold til målingene gjort ved 50,2 og 100 Hz. Grunnen til at dette skjer er beskrevet i Vedlegg E. Den målte forskyvningen er, ifølge Tabell E.3, 69,5 grader mot høyre. Denne faseforskyvningen kompenseres det for i Figur C.46.



Figur C.46: Utladninger i Kabelskjøt B, under måling gjort ved 0,1 Hz og 5,5 kV. Med å kompensere for faseforskyvningen som oppstår under måling ved 0,1 Hz, for Kabelskjøt B, forskyves alle utladningene fra Figur C.45 69,5 grader mot venstre.

Etter å ha kompensert for faseforskyvningen ved 0,1 Hz, i Kabelskjøt B, oppstår utladningene i omtrent samme faseområdet som ved 50,2 og 100 Hz.

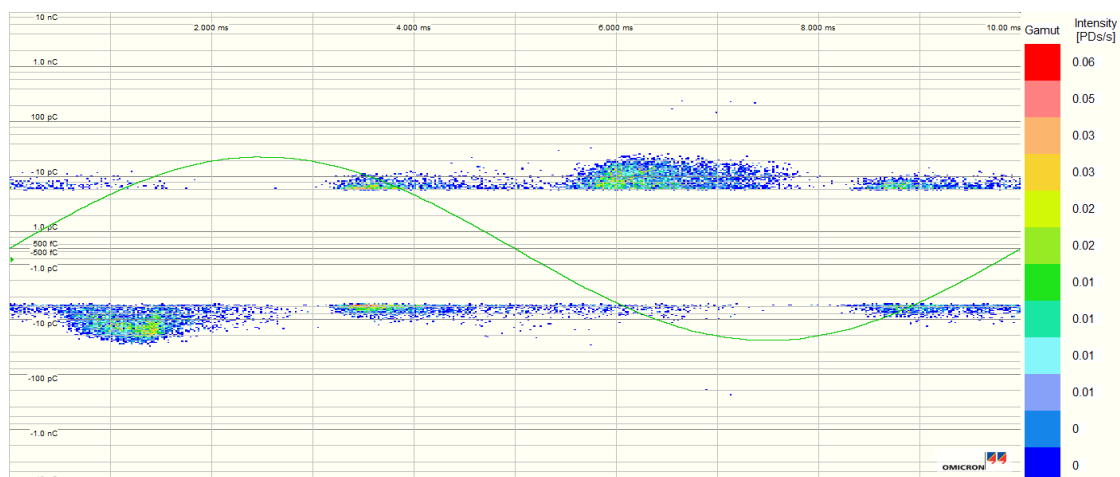
C.2.3 600 Perioder, Kabelskjøt C

600 Perioder, Kabelskjøt C, 100 Hz

Ved 100 Hz-målingen for Kabelskjøt C, registreres det utladninger over et stort faseområde. De fleste utladningene registreres mellom 180 og 270 grader i negativ halvperiode, og mellom 0 og 90 grader i positiv halvperiode, som for de andre testobjektene. Ved de tre andre frekvensene, for Kabelskjøt C, registreres det kun utladninger innenfor to relativt små faseområder. Utladningene ved 100 Hz, som ligger langt utenfor de to nevnte faseområdene, kan derfor være bakgrunnsstøy. Men om disse utladningene fjernes fra målingene, vil mange av utladningene mellom de to nevnte faseområdene også fjernes. Dette tas med i betraktningen senere, når måleverdiene behandles i Matlab.

Utladningene som er innenfor faseområdene 18-108 og 200 til 288 grader, blir tatt med videre i analysen av målingene.

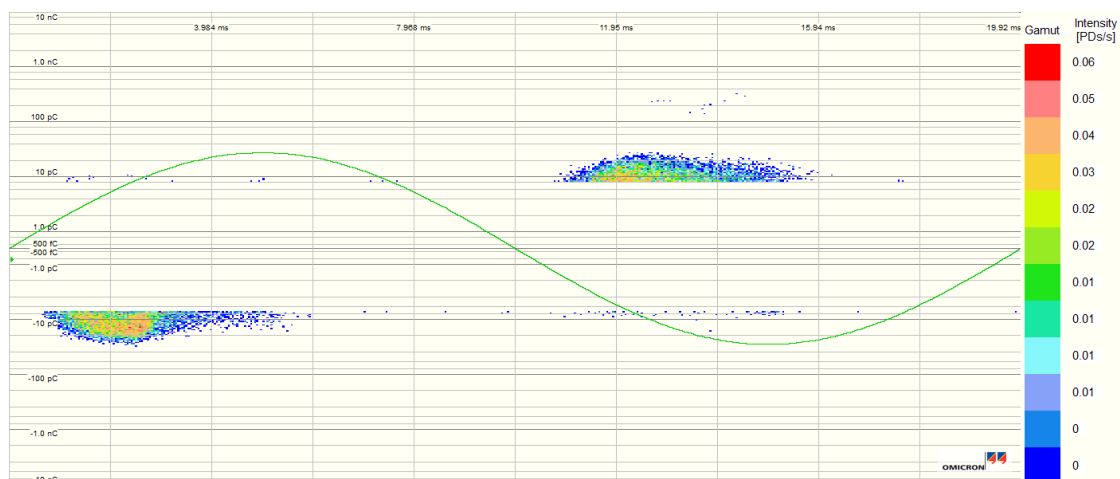
Spenningsnivået er her 11,0 kV, som er 0,5 kV høyere enn under tennspenningsmålingen, ved samme frekvens. Ved de tre andre frekvensene, måles det også ved høyere spenningsverdi under denne testen i forhold til tennspenningstesten. Forskjellen er 1,5 kV for både 50,2, 0,2 og 0,1 Hz, med lavere spenning under tennspenningstesten i alle tilfellene.



Figur C.47: Utladninger i Kabelskjøt C, under måling gjort ved 100 Hz og 11,0 kV. Målingen utføres i fem minutter, og har en støygrense på 5,5 pC. 600 tilfeldige perioder velges senere ut, ved hjelp av Matlab, for å kunne sammenligne med målinger gjort ved andre frekvenser. Utladningene som ligger utenfor faseområdene 180 - 270 og 0 - 90 grader, kan være bakgrunnsstøy, og dette må tas med i betraktningen når måleverdiene skal behandles i Matlab.

600 Perioder, Kabelskjøt C, 50,2 Hz

Målingene gjort ved 50,2 Hz, i Kabelskjøt C, viser at hovedandelen av utladningene skjer i området rundt den bratteste stigningen, både i positiv og negativ halvperiode. I motsetning til målingene ved 100 Hz, måles det ikke utladninger utenfor de to nevnte områdene, og alt av bakgrunnsstøy kan sies å ha blitt fjernet.



Figur C.48: Utladninger i Kabelskjøt C, under måling gjort ved 50,2 Hz og 11,5 kV. Målingen utføres i fem minutter, og har en støygrense på 7,5 pC. 600 tilfeldige perioder velges senere ut, ved hjelp av Matlab, for å kunne sammenligne med målinger gjort ved andre frekvenser.

600 Perioder, Kabelskjøt C, 0,2 Hz

Under målingene gjort ved 0,2 Hz, for Kabelskjøt C, registreres det utladninger i to faseområder. Det ene området er i den positive halvperioden, mens det andre er i den negative halvperioden. Alt av bakgrunnsstøy kan derfor sies å være fjernet. Støygrensen er på 10 pC, som betyr at alt av målinger som er under dette nivået, ikke blir tatt med i Figur C.49.



Figur C.49: Utladninger i Kabelskjøt C, under måling gjort ved 0,2 Hz og 9,5 kV. Målingen utføres i 50 minutter, og har en støygrense på 10,0 pC. 50 minutter ved 0,2 Hz tilsvarer 600 perioder, som kan sammenlignes med de andre frekvensene det måles ved.

Faseforskyvningen som oppstår ved 0,2 Hz, i Kabelskjøt C, er 25,7 grader mot høyre. Dette kompenseres det for i Figur C.50.

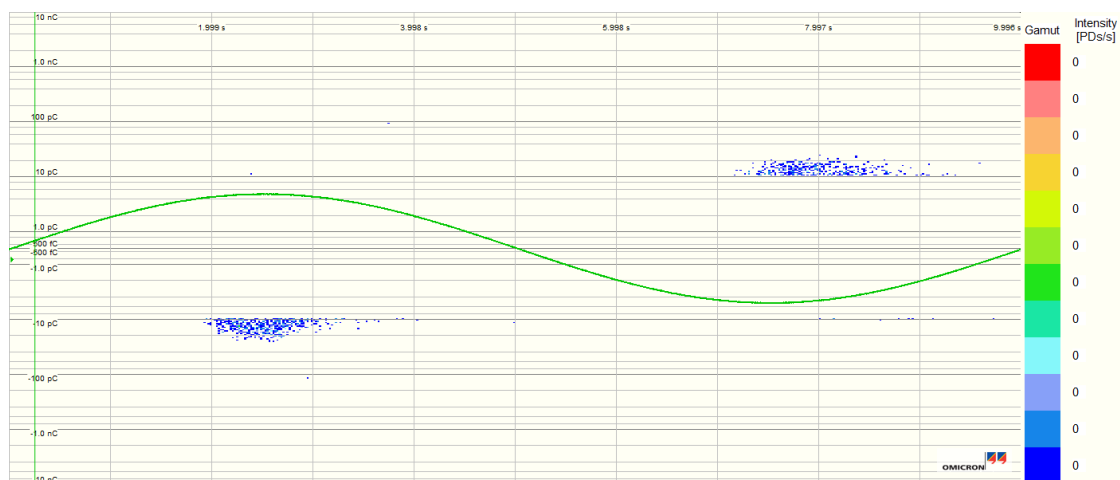


Figur C.50: Utladninger i Kabelskjøt C, under måling gjort ved 0,2 Hz og 9,5 kV, forskjøvet med 25,7 grader mot venstre.

600 Perioder, Kabelskjøt C, 0,1 Hz

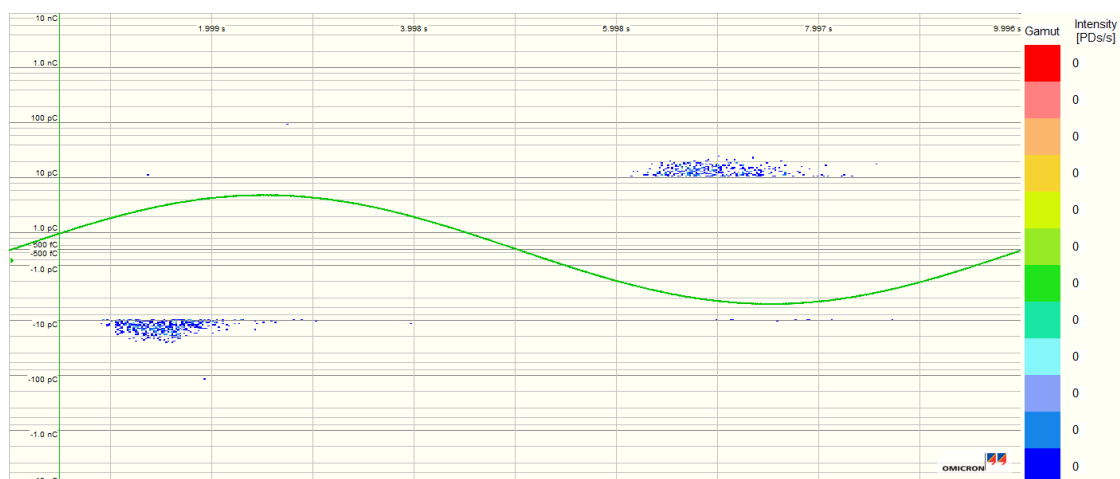
Ved 0,1 Hz-målingen, for Kabelskjøt C, måles det først utladninger når den påtrykte spenningen er 6,5 kV. For å fjerne alt av støy, settes støygrensen til 10

pC. Som for de to foregående frekvensene, registreres det kun utladninger i to faseområder, med en i hver halvperiode.



Figur C.51: Utladninger i Kabelskjøt C, under måling gjort ved 0,1 Hz og 6,5 kV. Målingen utføres i 100 minutter, og har en støygrense på 10,0 pC. 100 minutter ved 0,1 Hz tilsvarer 600 perioder, som kan sammenlignes med de andre frekvensene det måles ved.

Faseforskyvningen ved 0,1 Hz, for Kabelskjøt C, er 36,4 grader mot høyre, ifølge Tabell E.3. Dette kompenseres det for i Figur C.52.



Figur C.52: Utladninger i Kabelskjøt C, under måling gjort ved 0,1 Hz og 6,5 kV. Utladningene har her blitt forskjøvet med 36,4 grader mot venstre, i forhold til Figur C.51. Dette er for å kompensere for de kapasitive egenskapene til målekretsen, som gir en faseforskyvning ved 0,1 Hz.

C.3 600 perioder, Spenningsverdier og støynivå

Tabell C.1 viser støynivået som må til for å filtrere bort alt av bakgrunnsstøy, når det måles for å finne 600 perioder. Spenningsnivået det måles ved er også oppgitt.

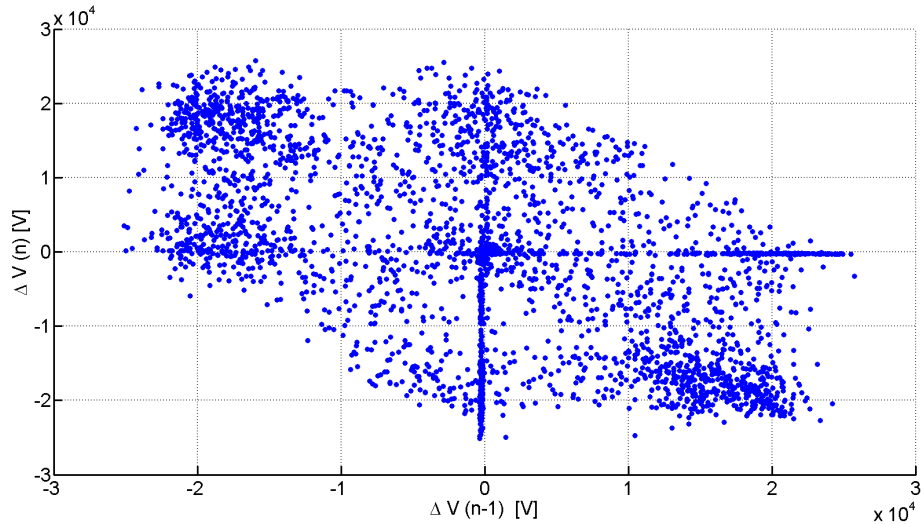
Tabell C.1: Spenningsnivå og støygrense under måling av 600 tilfeldige perioder.

Kabelskjøt		0,1 Hz	0,2 Hz	50,2 Hz	100 Hz
A	Spenningsnivå:	8,5 kV	9,0 kV	11,0 kV	10,5 kV
	Støygrense:	10,5 pC	8,0 pC	6,0 pC	7,0 pC
B	Spenningsnivå:	5,5 kV	8,0 kV	9,0 kV	9,0 kV
	Støygrense:	8,0 pC	8,0 pC	6,5 pC	5,5 pC
C	Spenningsnivå:	6,5 kV	9,5 kV	11,5 kV	11,0 kV
	Støygrense:	10,0 pC	10,0 pC	7,5 pC	5,5 pC

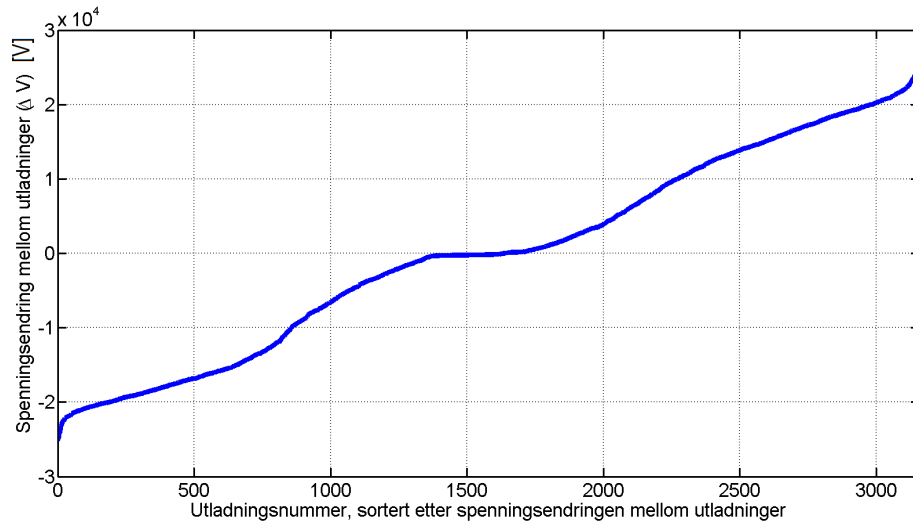
C.4 Pulssekvensanalyse

C.4.1 Pulssekvensanalyse, Kabelskjøt A

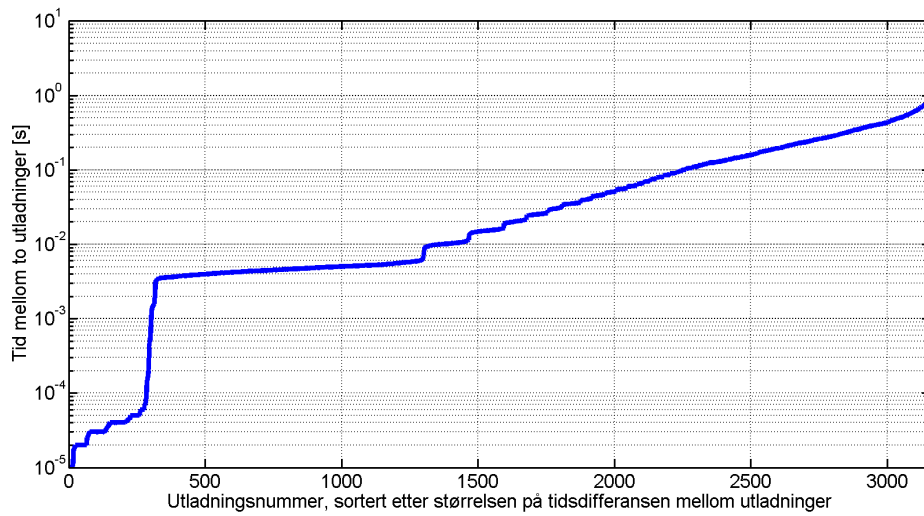
Pulssekvensanalyse, Kabelskjøt A, 100 Hz



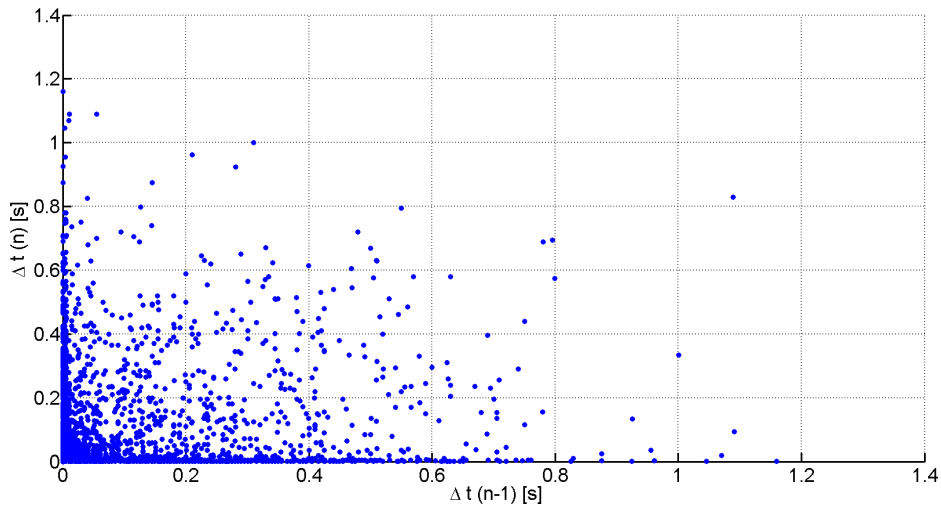
Figur C.53: Spenningsforskjell mellom utladninger, plottet etter prinsippet beskrevet i Kapittel 2.4.2. Målingene er fra Kabelskjøt A, utført ved 10,5 kV og 100 Hz. Måleperioden er på fem minutter.



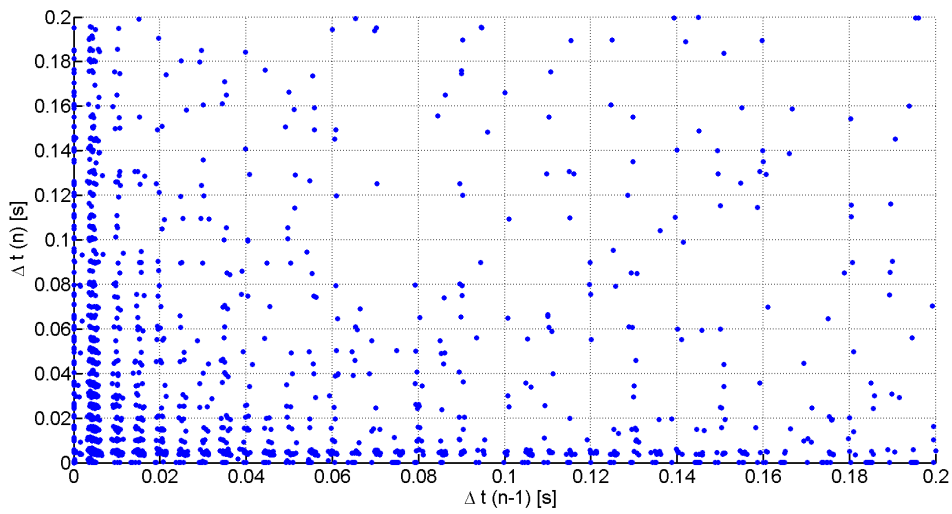
Figur C.54: Sortert spenningsendring mellom utladninger i Kabelskjøt A, ved 100 Hz.



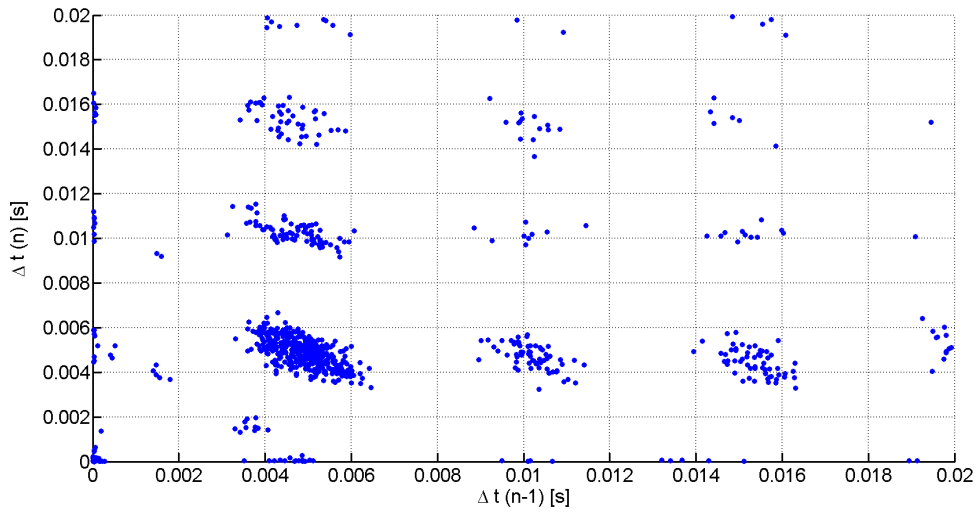
Figur C.55: Tidsforskjell mellom utladninger, plottet i stigende rekkefølge. Målingene er fra Kabelskjøt A, utført ved 10,5 kV og 100 Hz. Måleperioden er på fem minutter.



Figur C.56: Tidsforskjell mellom utladninger, plottet etter prinsippet beskrevet i Kapittel 2.4.2. Målingene er fra Kabelskjøt A, utført ved 10,5 kV og 100 Hz. Måleperioden er på fem minutter.

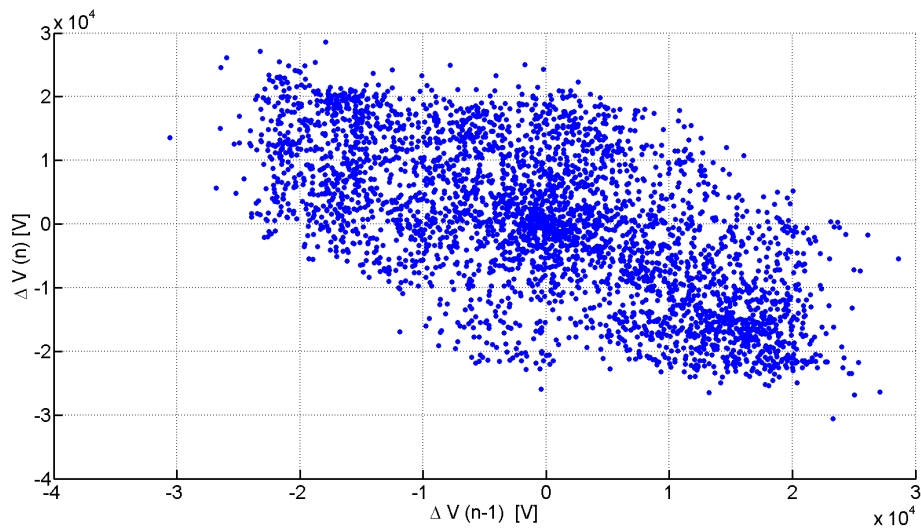


Figur C.57: Tidsforskjell mellom utladninger, plottet etter prinsippet beskrevet i Kapittel 2.4.2. Figuren viser det samme som Figur C.56, bare med verdiene som ligger innenfor verdien 0,2 på både x- og y-aksen. Målingene er fra Kabelskjøt A, utført ved 10,5 kV og 100 Hz. Måleperioden er på fem minutter.

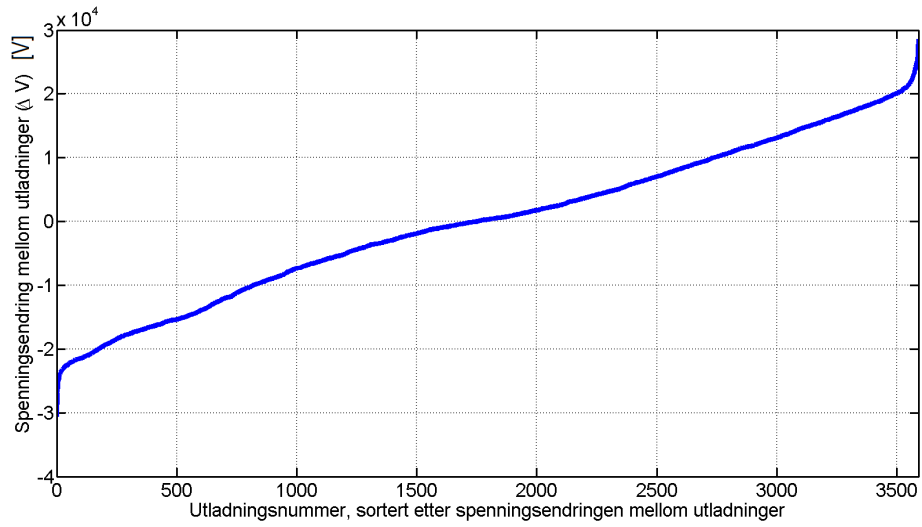


Figur C.58: Tidsforskjell mellom utladninger, plottet etter prinsippet beskrevet i Kapittel 2.4.2. Figuren viser det samme som Figur C.56, bare med verdiene som ligger innenfor verdien 0,02 på både x- og y-aksen. Målingene er fra Kabelskjøt A, utført ved 10,5 kV og 100 Hz. Måleperioden er på fem minutter.

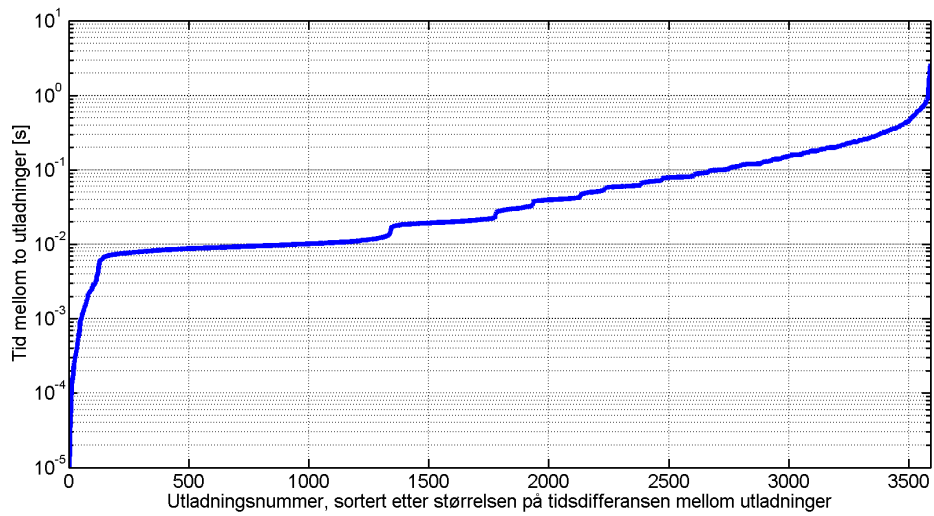
Pulssekvensanalyse, Kabelskjøt A, 50,2 Hz



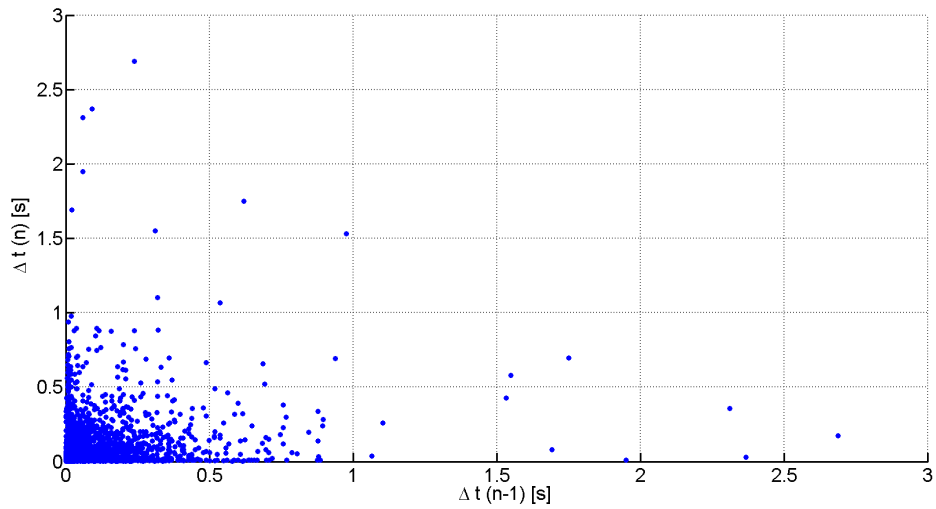
Figur C.59: Spenningsforskjell mellom utladninger, plottet etter prinsippet beskrevet i Kapittel 2.4.2. Målingene er fra Kabelskjøt A, utført ved 11,0 kV og 50,2 Hz. Måleperioden er på fem minutter.



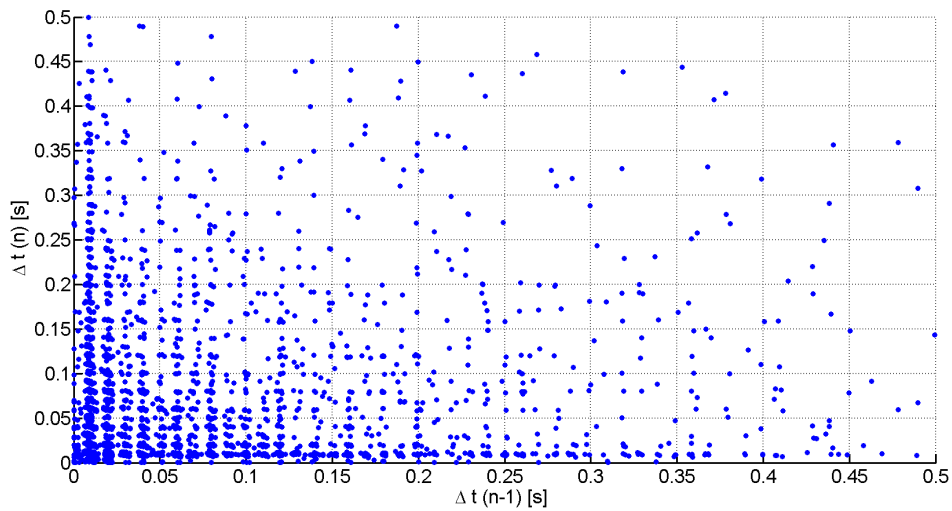
Figur C.60: Sortert spenningsendring mellom utladninger i Kabelskjøt A, ved 50,2 Hz.



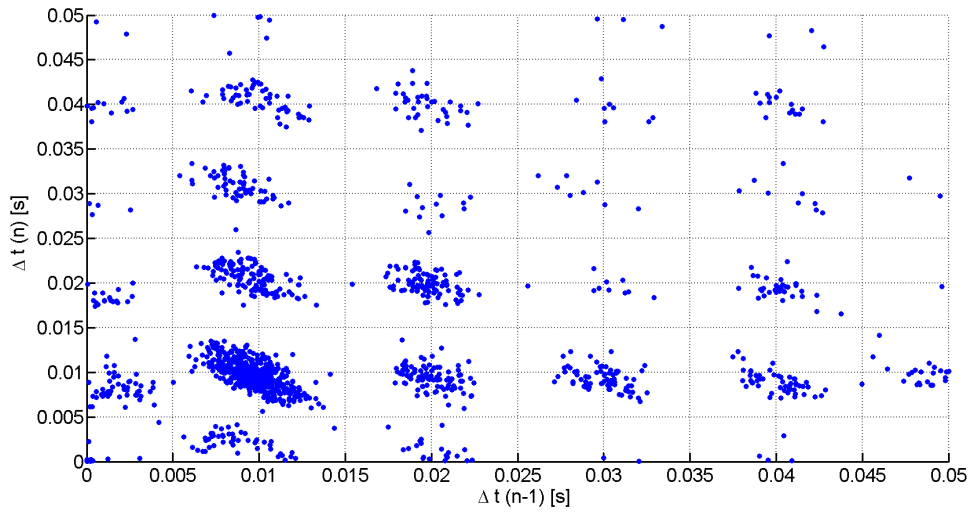
Figur C.61: Tidsforskjell mellom utladninger, plottet i stigende rekkefølge. Målingene er fra Kabelskjøt A, utført ved 11,0 kV og 50,2 Hz. Måleperioden er på fem minutter.



Figur C.62: Tidsforskjell mellom utladninger, plottet etter prinsippet beskrevet i Kapittel 2.4.2. Målingene er fra Kabelskjøt A, utført ved 11,0 kV og 50,2 Hz. Måleperioden er på fem minutter.

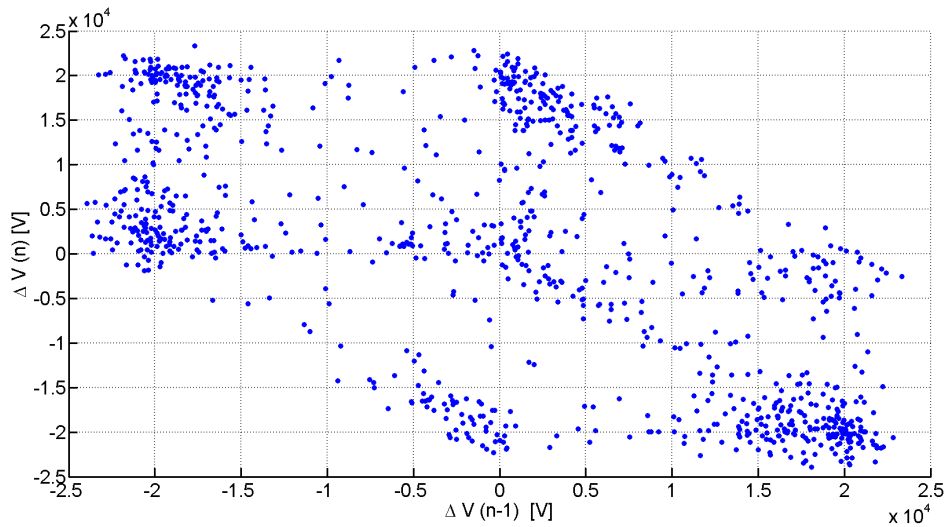


Figur C.63: Tidsforskjell mellom utladninger, plottet etter prinsippet beskrevet i Kapittel 2.4.2. Figuren viser det samme som Figur C.62, bare med verdiene som ligger innenfor verdien 0,5 på både x- og y-aksen. Målingene er fra Kabelskjøt A, utført ved 11,0 kV og 50,2 Hz. Måleperioden er på fem minutter.

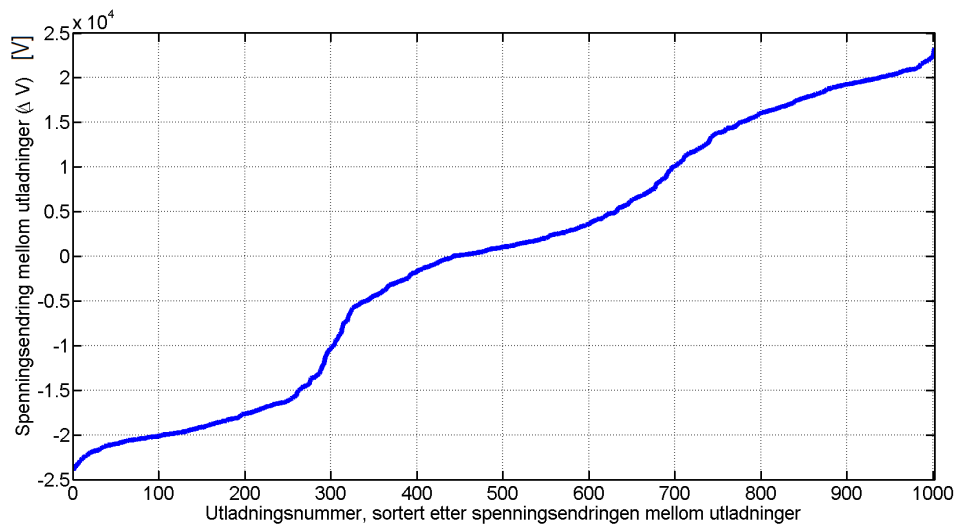


Figur C.64: Tidsforskjell mellom utladninger, plottet etter prinsippet beskrevet i Kapittel 2.4.2. Figuren viser det samme som Figur C.62, bare med verdiene som ligger innenfor verdien 0,05 på både x- og y-aksen. Målingene er fra Kabelskjøt A, utført ved 11,0 kV og 50,2 Hz. Måleperioden er på fem minutter.

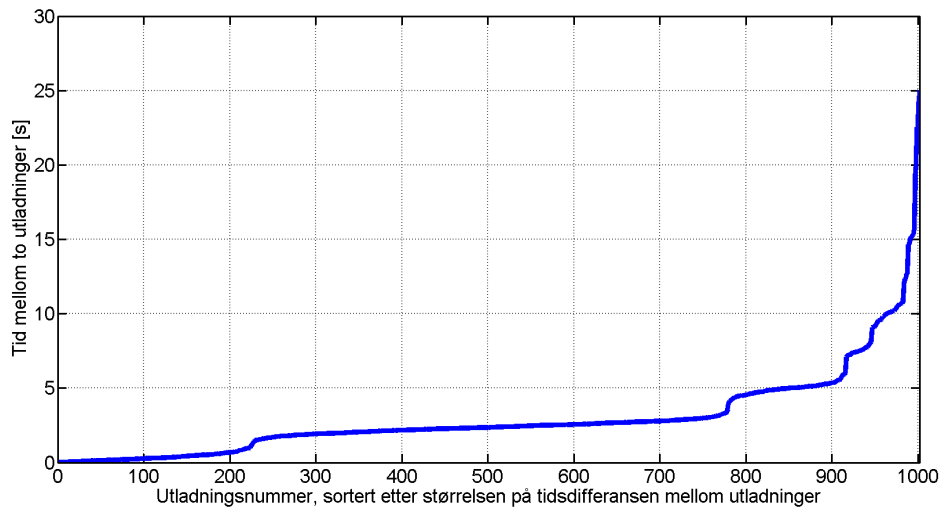
Pulssekvensanalyse, Kabelskjøt A, 0,2 Hz



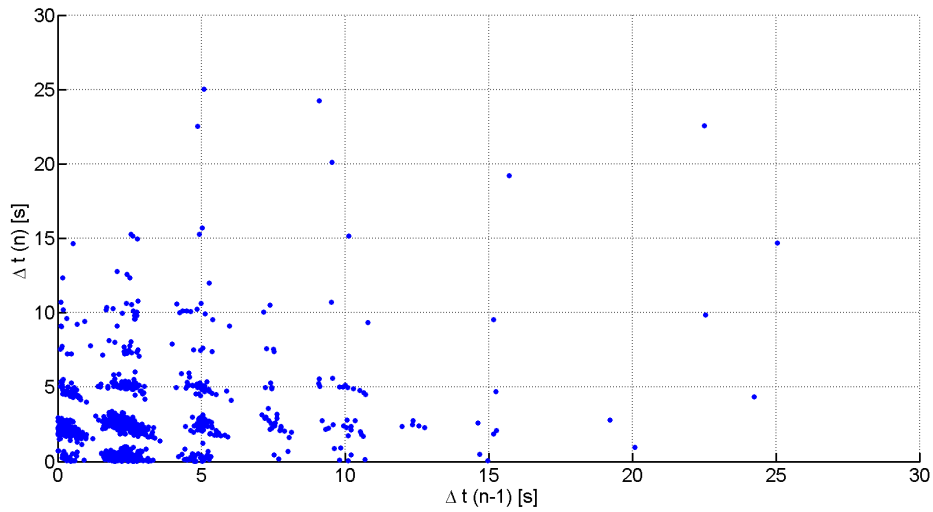
Figur C.65: Spenningsforskjell mellom utladninger, plottet etter prinsippet beskrevet i Kapittel 2.4.2. Målingene er fra Kabelskjøt A, utført ved 9,0 kV og 0,2 Hz. Måleperioden er på 50 minutter.



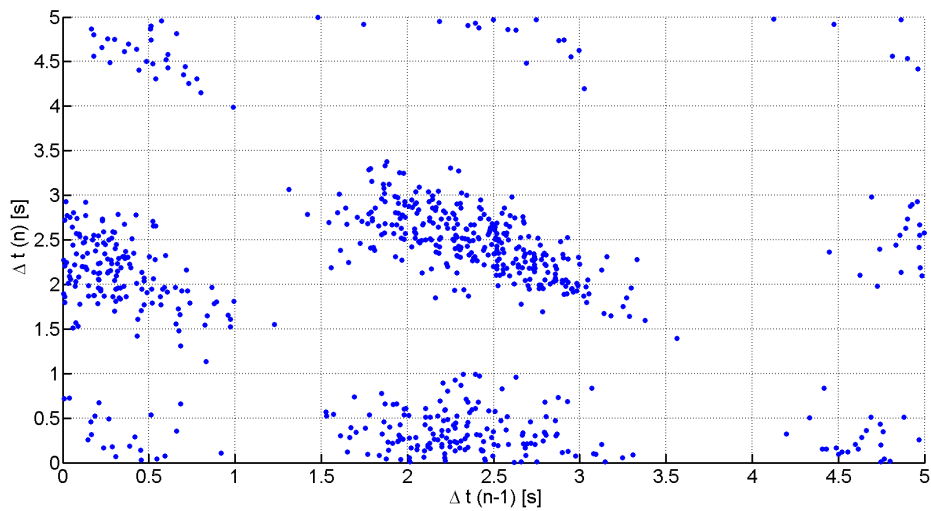
Figur C.66: Sortert spenningsendring mellom utladninger i Kabelskjøt A, ved 0,2 Hz.



Figur C.67: Tidsforskjell mellom utladninger, plottet i stigende rekkefølge. Målingene er fra Kabelskjøt A, utført ved 9,0 kV og 0,2 Hz. Måleperioden er på 50 minutter.

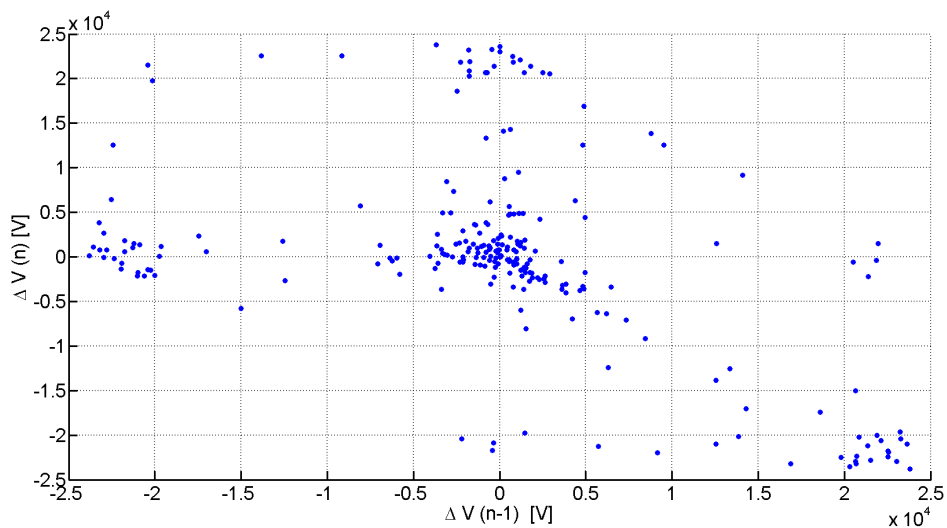


Figur C.68: Tidsforskjell mellom utladninger, plottet etter prinsippet beskrevet i Kapittel 2.4.2. Målingene er fra Kabelskjøt A, utført ved 9,0 kV og 0,2 Hz. Måleperioden er på 50 minutter.

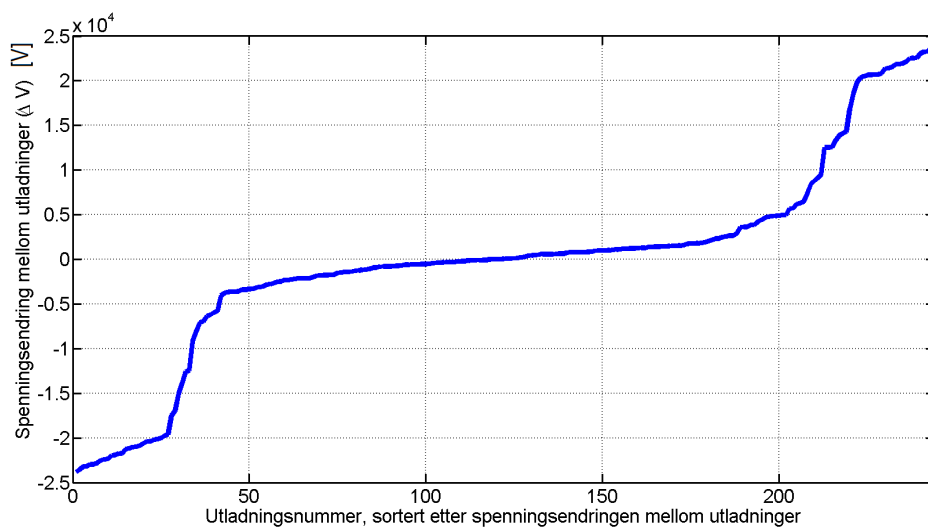


Figur C.69: Tidsforskjell mellom utladninger, plottet etter prinsippet beskrevet i Kapittel 2.4.2. Figuren viser det samme som Figur C.68, bare med verdiene som ligger innenfor verdien 5 på både x- og y-aksen. Målingene er fra Kabelskjøt A, utført ved 9,0 kV og 0,2 Hz. Måleperioden er på 50 minutter.

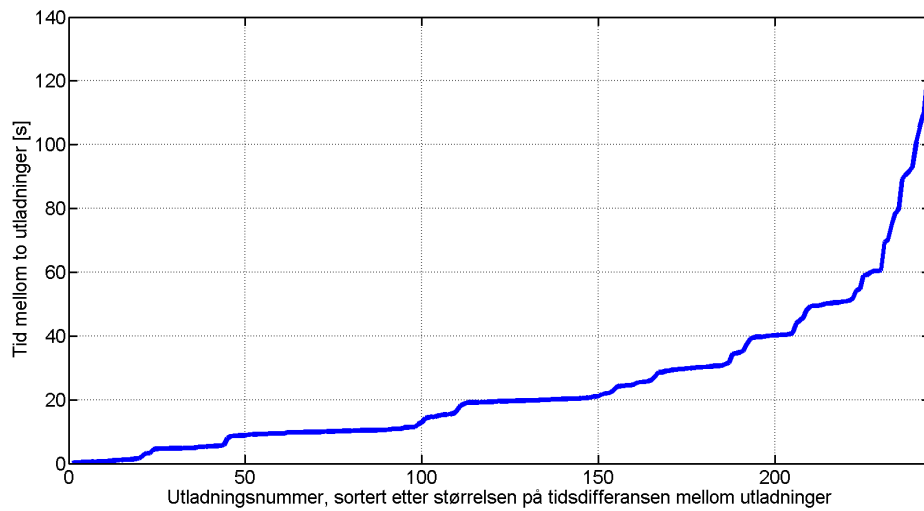
Pulssekvensanalyse, Kabelskjøt A, 0,1 Hz



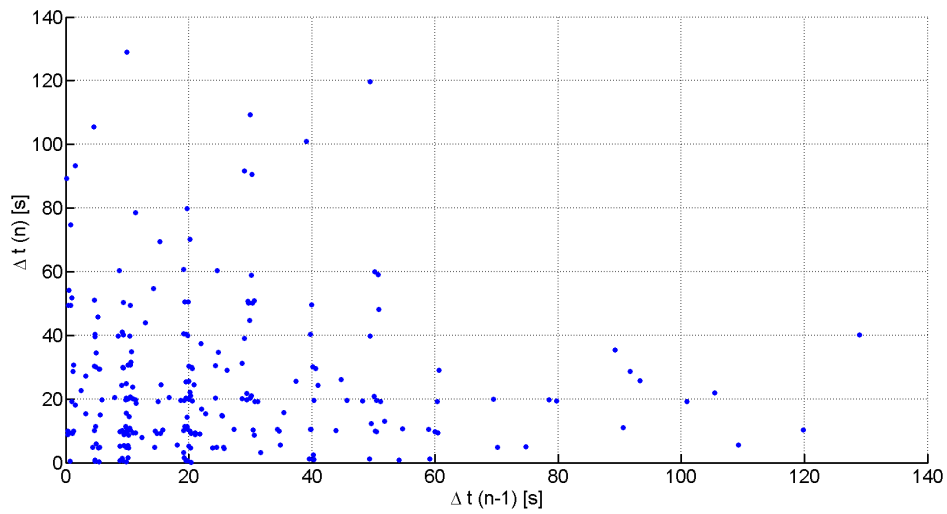
Figur C.70: Spenningsforskjell mellom utladninger, plottet etter prinsippet beskrevet i Kapittel 2.4.2. Målingene er fra Kabelskjøt A, utført ved 8,5 kV og 0,1 Hz. Måleperioden er på 100 minutter.



Figur C.71: Sortert spenningsendring mellom utladninger i Kabelskjøt A, ved 0,1 Hz.



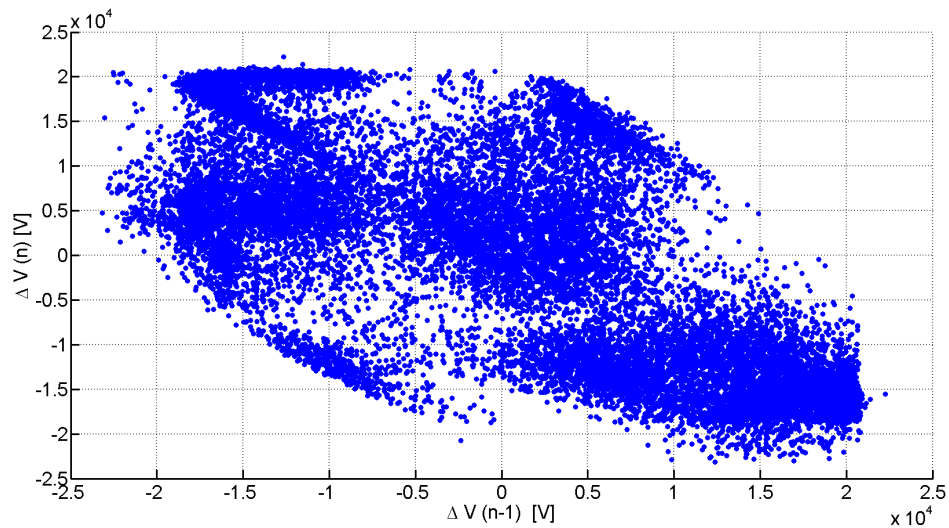
Figur C.72: Tidsforskjell mellom utladninger, plottet i stigende rekkefølge. Målingene er fra Kabelskjøt A, utført ved 8,5 kV og 0,1 Hz. Måleperioden er på 100 minutter.



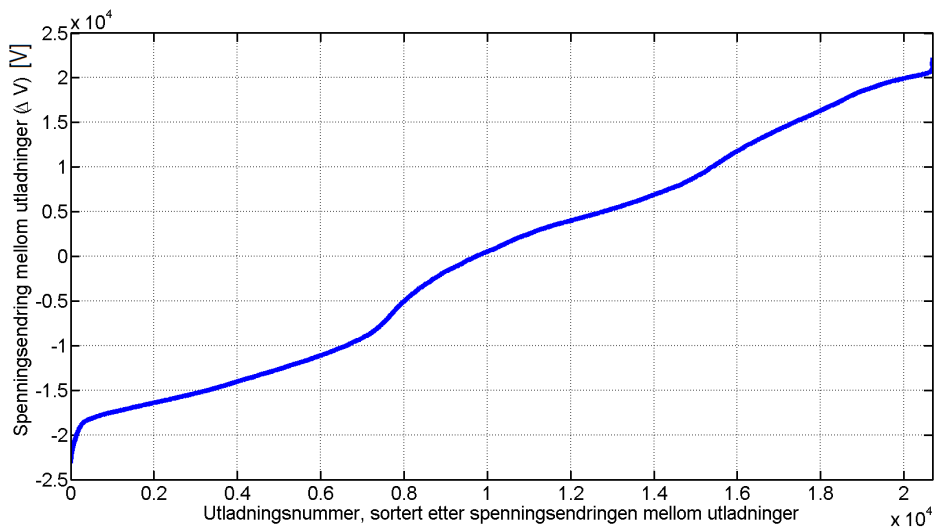
Figur C.73: Tidsforskjell mellom utladninger, plottet etter prinsippet beskrevet i Kapittel 2.4.2. Målingene er fra Kabelskjøt A, utført ved 8,5 kV og 0,1 Hz. Måleperioden er på 100 minutter.

C.4.2 Pulssekvensanalyse, Kabelskjøt B

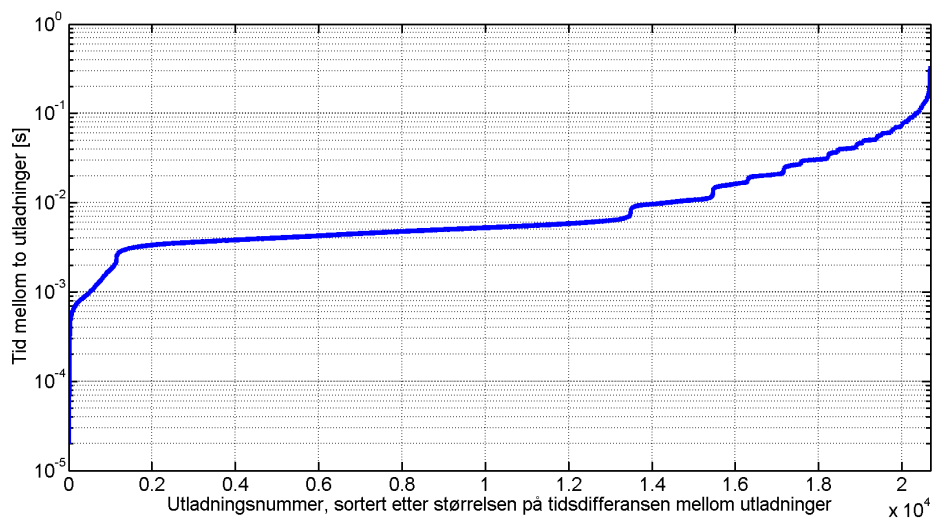
Pulssekvensanalyse, Kabelskjøt B, 100 Hz



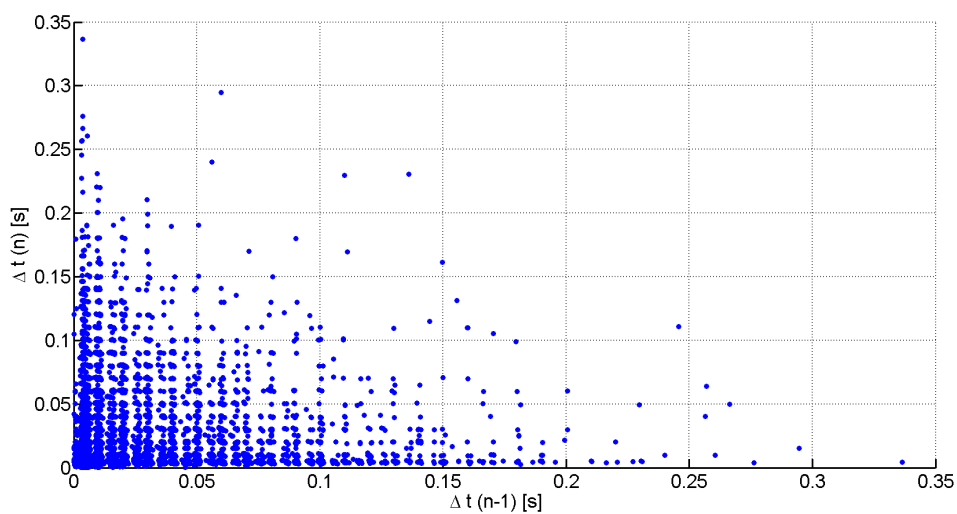
Figur C.74: Spenningsforskjell mellom utladninger, plottet etter prinsippet beskrevet i Kapittel 2.4.2. Målingene er fra Kabelskjøt B, utført ved 9,0 kV og 100 Hz. Måleperioden er på fem minutter.



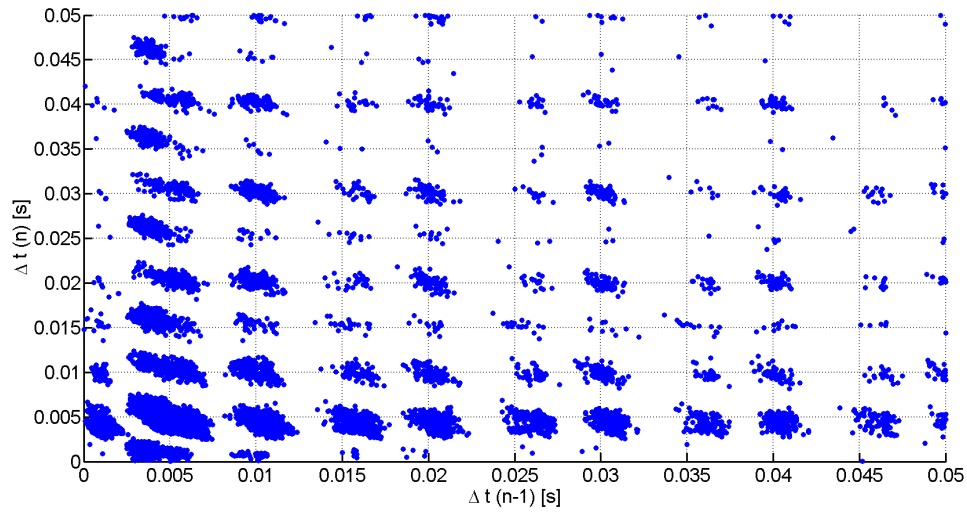
Figur C.75: Sortert spenningsendring mellom utladninger i Kabelskjøt B, ved 100 Hz.



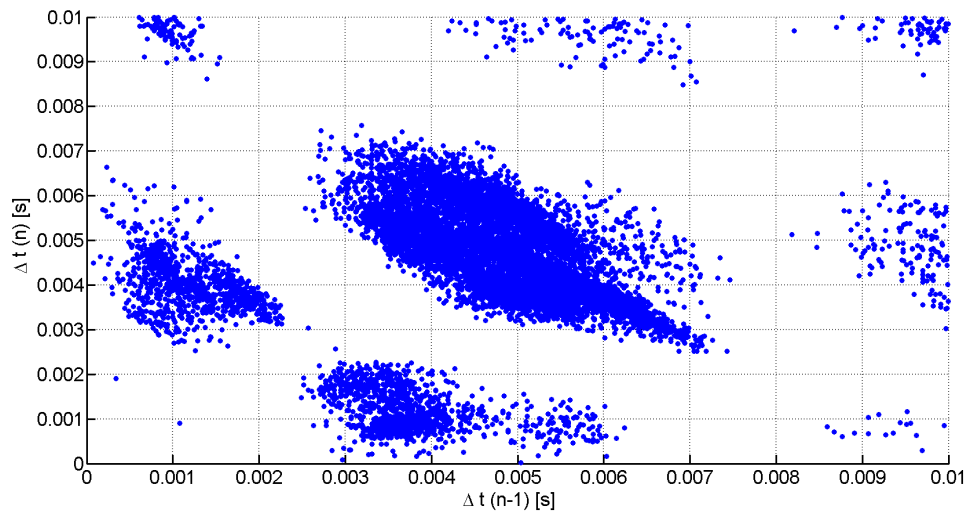
Figur C.76: Tidsforskjell mellom utladninger, plottet i stigende rekkefølge. Målingene er fra Kabelskjøt B, utført ved 9,0 kV og 100 Hz. Måleperioden er på fem minutter.



Figur C.77: Tidsforskjell mellom utladninger, plottet etter prinsippet beskrevet i Kapittel 2.4.2. Målingene er fra Kabelskjøt B, utført ved 9,0 kV og 100 Hz. Måleperioden er på fem minutter.

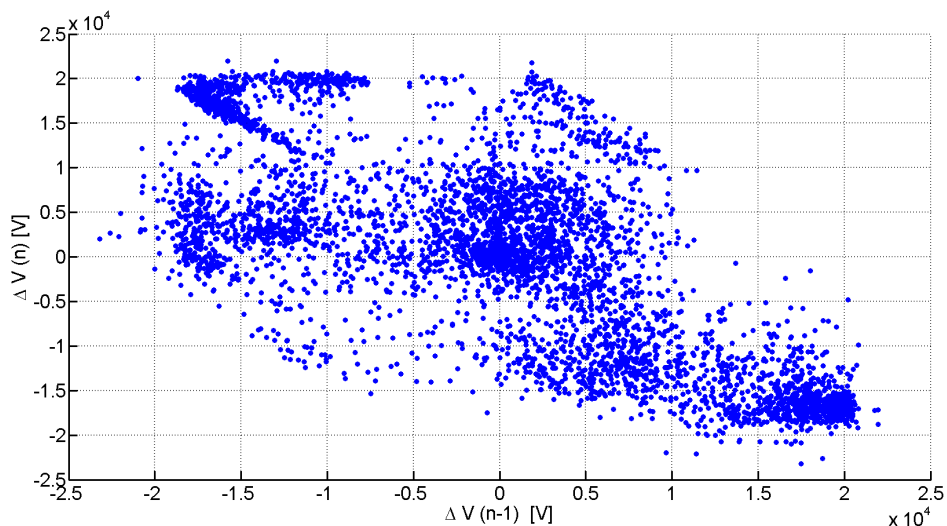


Figur C.78: Tidsforskjell mellom utladninger, plottet etter prinsippet beskrevet i Kapittel 2.4.2. Figuren viser det samme som Figur C.77, bare med verdiene som ligger innenfor verdien 0,05 på både x- og y-aksen. Målingene er fra Kabelskjøt B, utført ved 9,0 kV og 100 Hz. Måleperioden er på fem minutter.

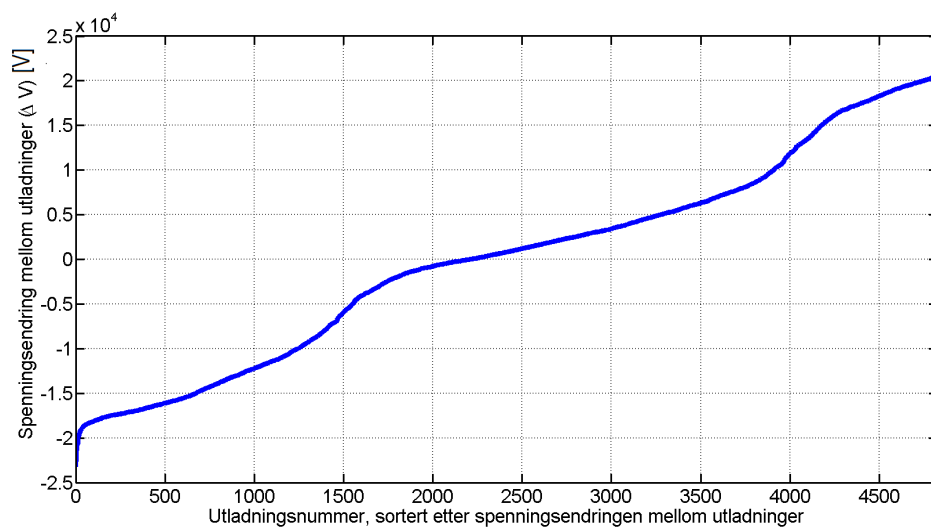


Figur C.79: Tidsforskjell mellom utladninger, plottet etter prinsippet beskrevet i Kapittel 2.4.2. Figuren viser det samme som Figur C.77, bare med verdiene som ligger innenfor verdien 0,01 på både x- og y-aksen. Målingene er fra Kabelskjøt B, utført ved 9,0 kV og 100 Hz. Måleperioden er på fem minutter.

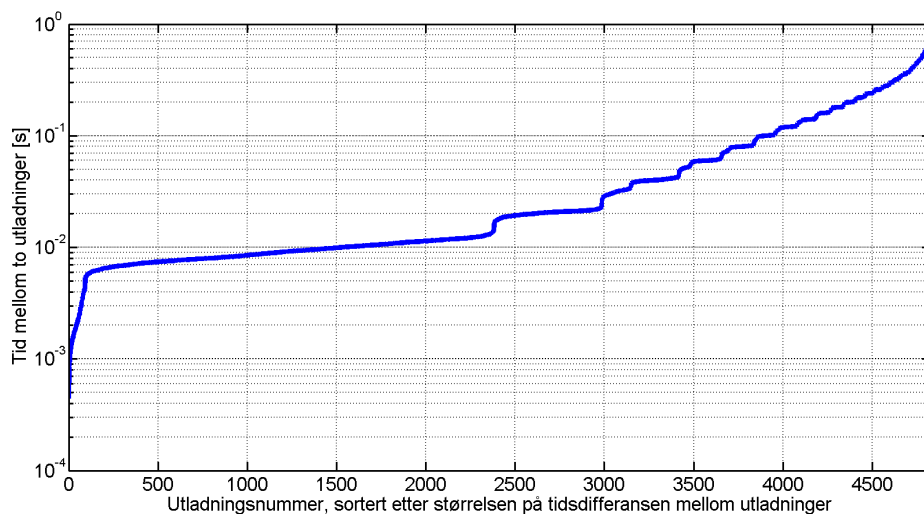
Pulssekvensanalyse, Kabelskjøt B, 50,2 Hz



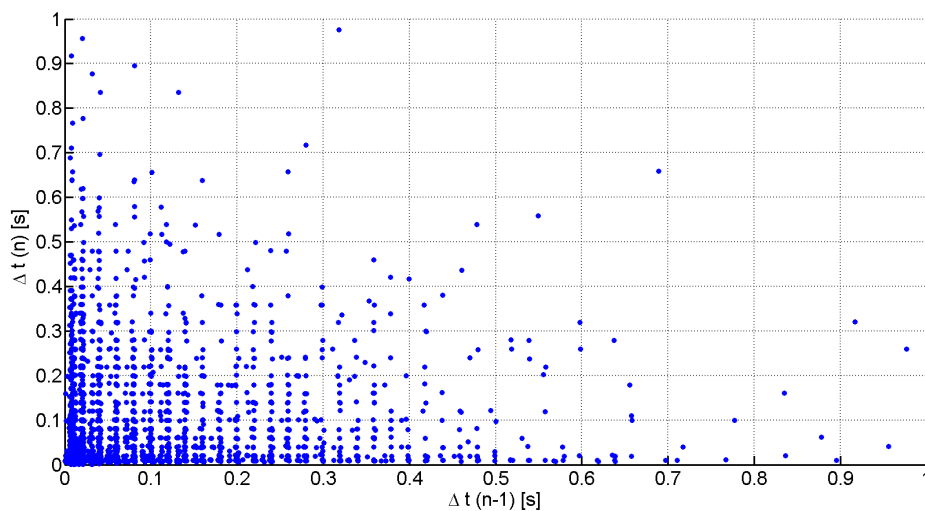
Figur C.80: Spenningsforskjell mellom utladninger, plottet etter prinsippet beskrevet i Kapittel 2.4.2. Målingene er fra Kabelskjøt B, utført ved 9,0 kV og 50,2 Hz. Måleperioden er på fem minutter.



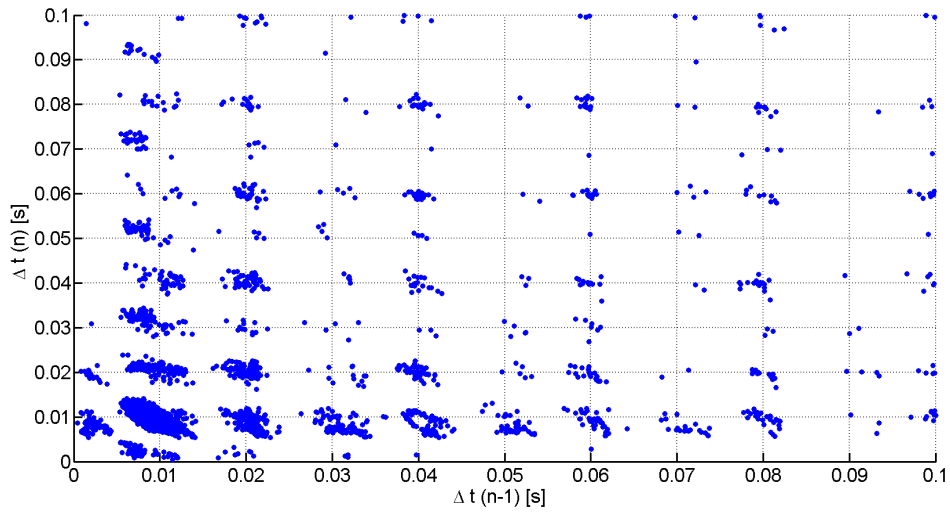
Figur C.81: Sortert spenningsendring mellom utladninger i Kabelskjøt B, ved 50,2 Hz.



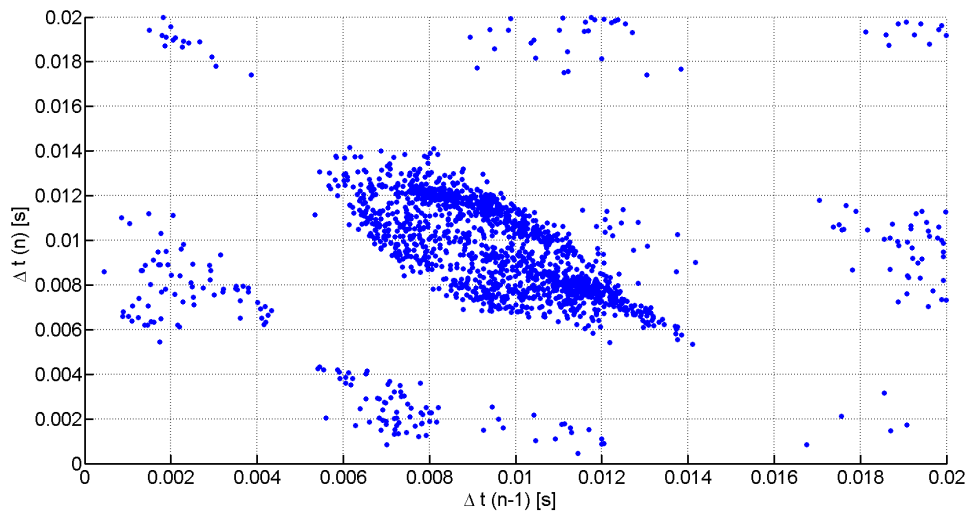
Figur C.82: Tidsforskjell mellom utladninger, plottet i stigende rekkefølge. Målingene er fra Kabelskjøt B, utført ved 9,0 kV og 50,2 Hz. Måleperioden er på fem minutter.



Figur C.83: Tidsforskjell mellom utladninger, plottet etter prinsippet beskrevet i Kapittel 2.4.2. Målingene er fra Kabelskjøt B, utført ved 9,0 kV og 50,2 Hz. Måleperioden er på fem minutter.

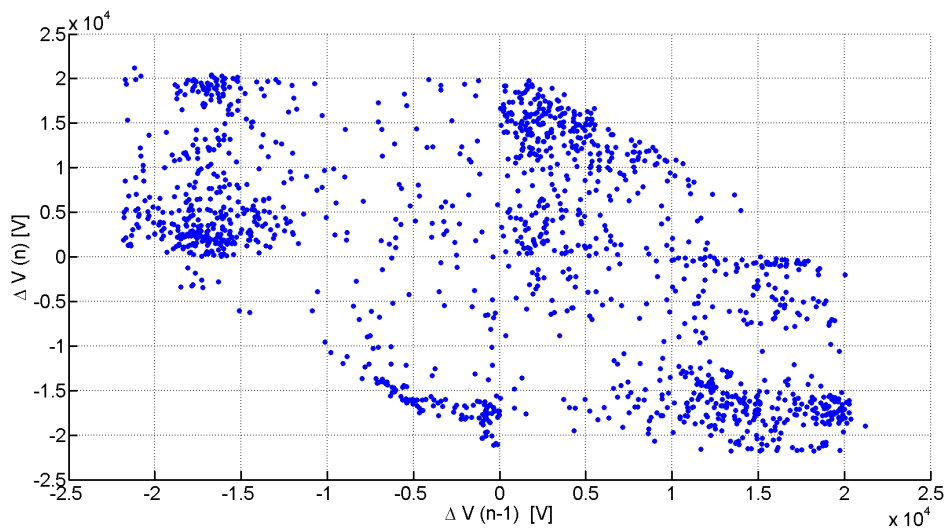


Figur C.84: Tidsforskjell mellom utladninger, plottet etter prinsippet beskrevet i Kapittel 2.4.2. Figuren viser det samme som Figur C.83, bare med verdiene som ligger innenfor verdien 0,1 på både x- og y-aksen. Målingene er fra Kabelskjøt B, utført ved 9,0 kV og 50,2 Hz. Måleperioden er på fem minutter.

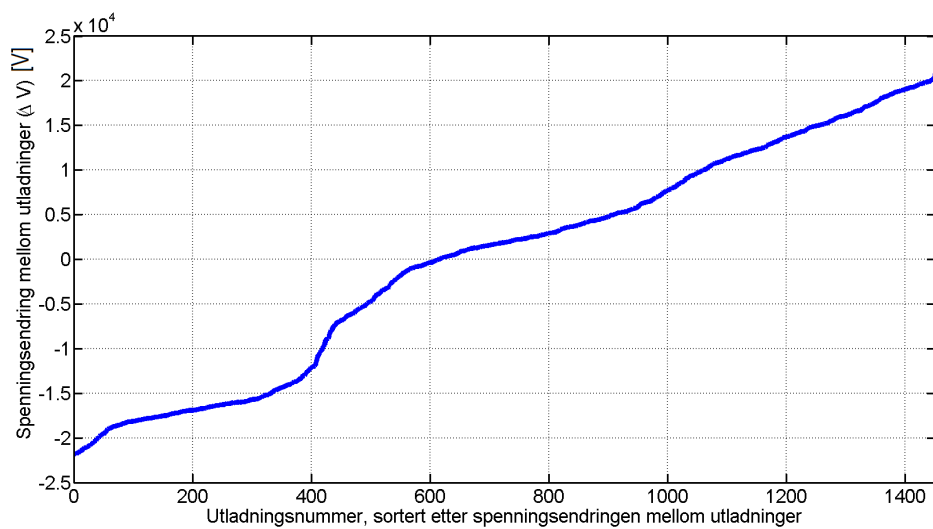


Figur C.85: Tidsforskjell mellom utladninger, plottet etter prinsippet beskrevet i Kapittel 2.4.2. Figuren viser det samme som Figur C.83, bare med verdiene som ligger innenfor verdien 0,02 på både x- og y-aksen. Målingene er fra Kabelskjøt B, utført ved 9,0 kV og 50,2 Hz. Måleperioden er på fem minutter.

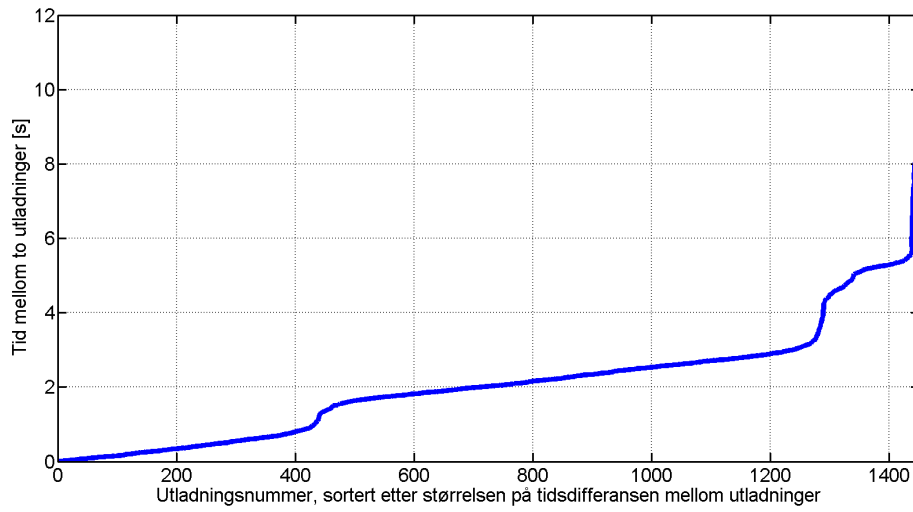
Pulssekvensanalyse, Kabelskjøt B, 0,2 Hz



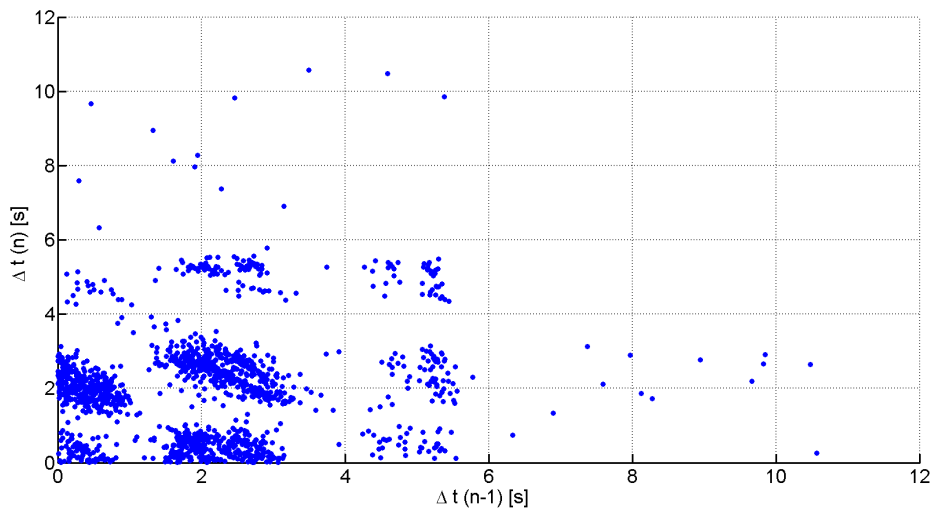
Figur C.86: Spenningsforskjell mellom utladninger, plottet etter prinsippet beskrevet i Kapittel 2.4.2. Målingene er fra Kabelskjøt B, utført ved 8,0 kV og 0,2 Hz. Måleperioden er på 50 minutter.



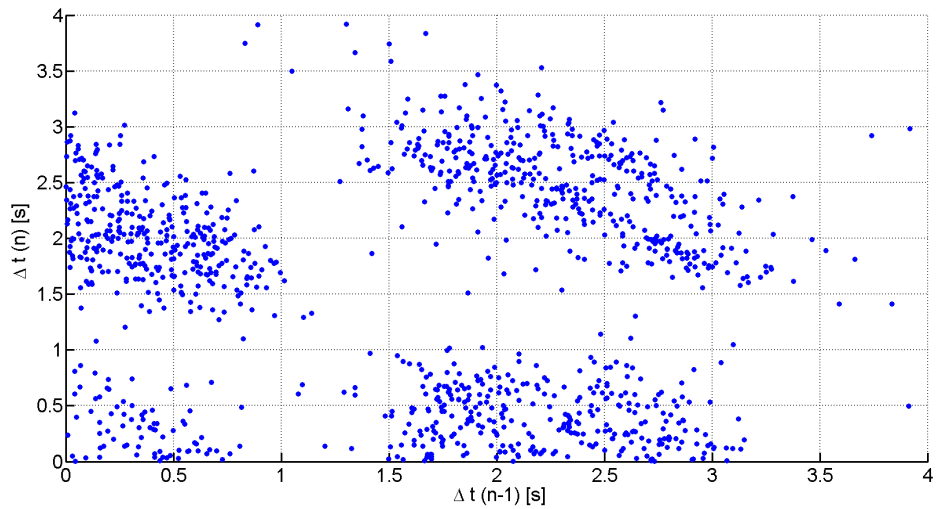
Figur C.87: Sortert spenningsendring mellom utladninger i Kabelskjøt B, ved 0,2 Hz.



Figur C.88: Tidsforskjell mellom utladninger, plottet i stigende rekkefølge. Målingene er fra Kabelskjøt B, utført ved 8,0 kV og 0,2 Hz. Måleperioden er på 50 minutter.

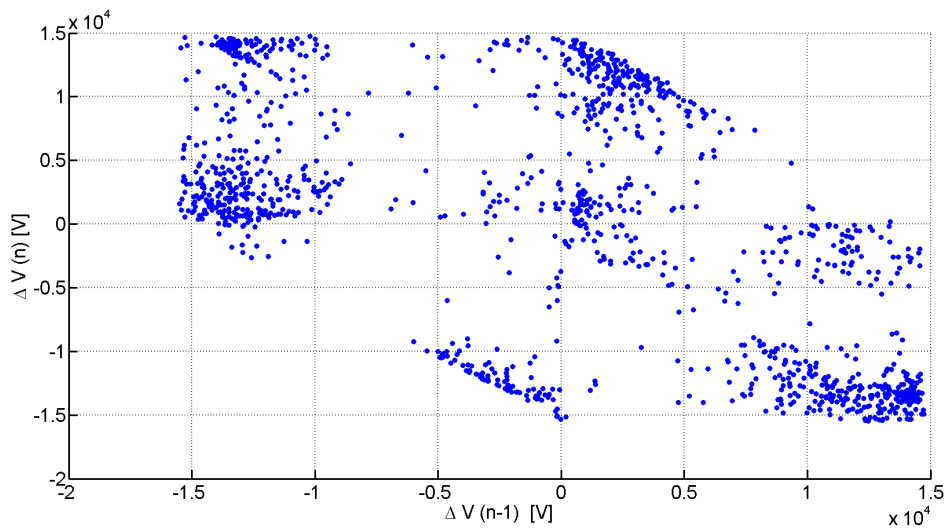


Figur C.89: Tidsforskjell mellom utladninger, plottet etter prinsippet beskrevet i Kapittel 2.4.2. Målingene er fra Kabelskjøt B, utført ved 8,0 kV og 0,2 Hz. Måleperioden er på 50 minutter.

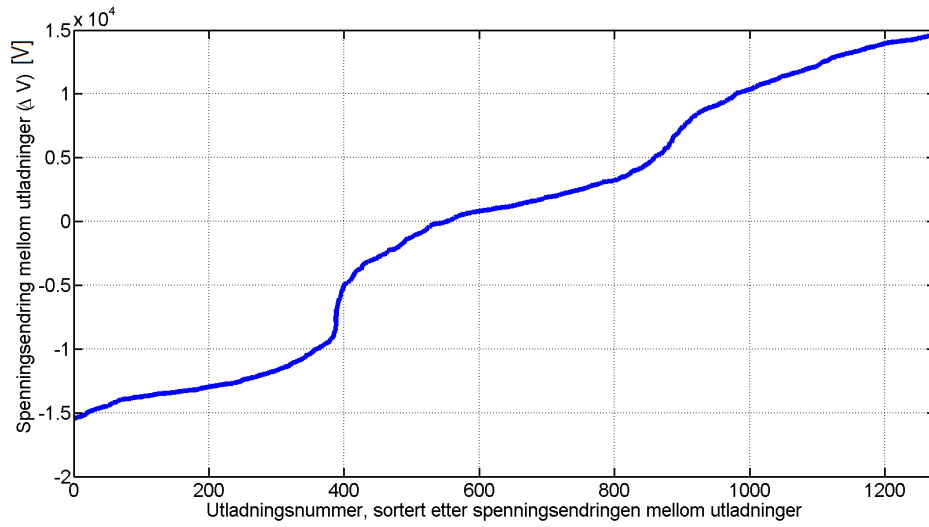


Figur C.90: Tidsforskjell mellom utladninger, plottet etter prinsippet beskrevet i Kapittel 2.4.2. Figuren viser det samme som Figur C.89, bare med verdiene som ligger innenfor verdien 4 på både x- og y-aksen. Målingene er fra Kabelskjøt B, utført ved 8,0 kV og 0,2 Hz. Måleperioden er på 50 minutter.

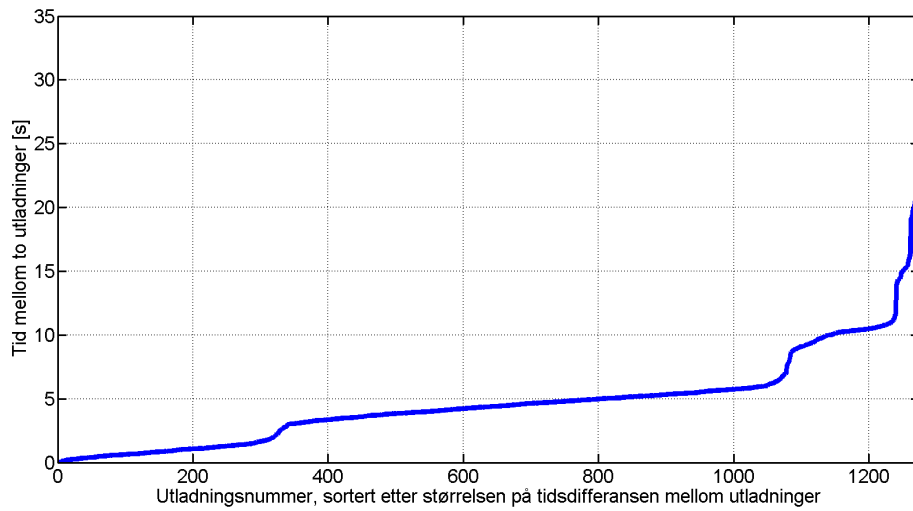
Pulssekvensanalyse, Kabelskjøt B, 0,1 Hz



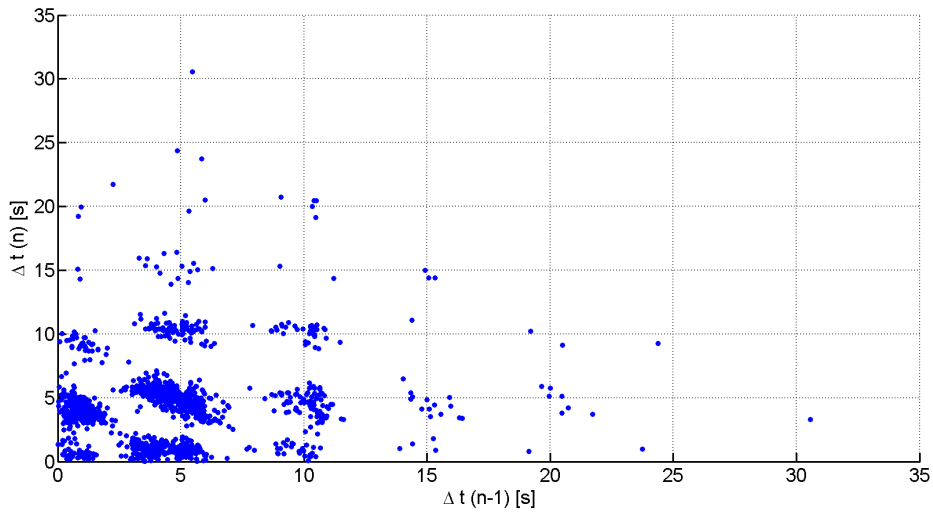
Figur C.91: Spenningsforskjell mellom utladninger, plottet etter prinsippet beskrevet i Kapittel 2.4.2. Målingene er fra Kabelskjøt B, utført ved 5,5 kV og 0,1 Hz. Måleperioden er på 100 minutter.



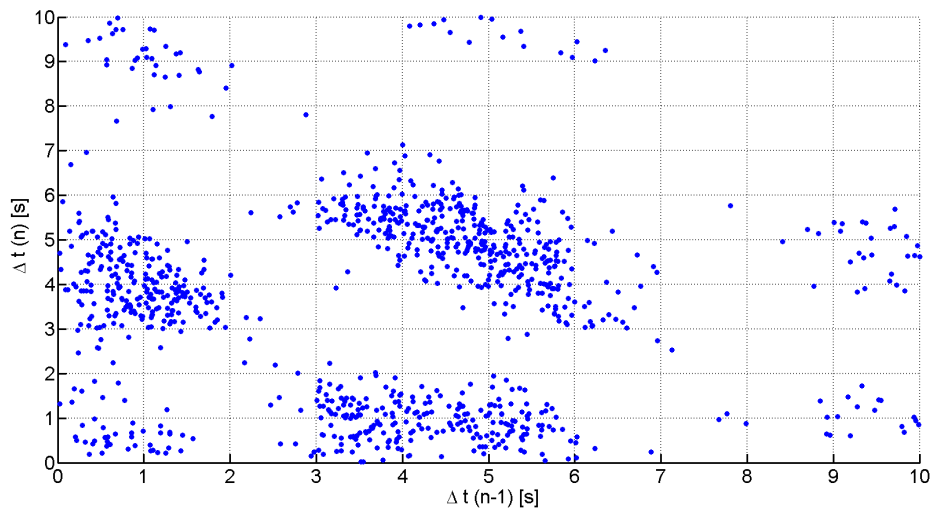
Figur C.92: Sortert spenningsendring mellom utladninger i Kabelskjøt B, ved 0,1 Hz.



Figur C.93: Tidsforskjell mellom utladninger, plottet i stigende rekkefølge. Målingene er fra Kabelskjøt B, utført ved 5,5 kV og 0,1 Hz. Måleperioden er på 100 minutter.



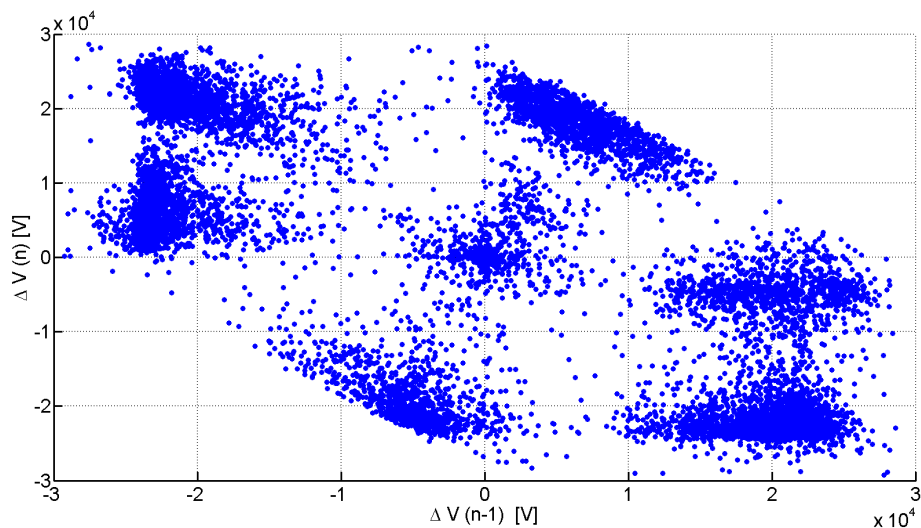
Figur C.94: Tidsforskjell mellom utladninger, plottet etter prinsippet beskrevet i Kapittel 2.4.2. Målingene er fra Kabelskjøt B, utført ved 5,5 kV og 0,1 Hz. Måleperioden er på 100 minutter.



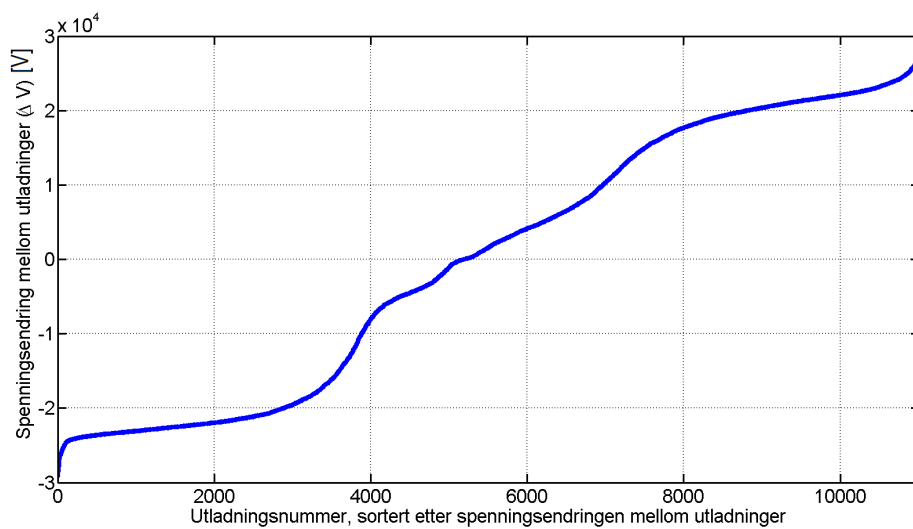
Figur C.95: Tidsforskjell mellom utladninger, plottet etter prinsippet beskrevet i Kapittel 2.4.2. Figuren viser det samme som Figur C.94, bare med verdiene som ligger innenfor verdien 10 på både x- og y-aksen. Målingene er fra Kabelskjøt B, utført ved 5,5 kV og 0,1 Hz. Måleperioden er på 100 minutter.

C.4.3 Pulssekvensanalyse, Kabelskjøt C

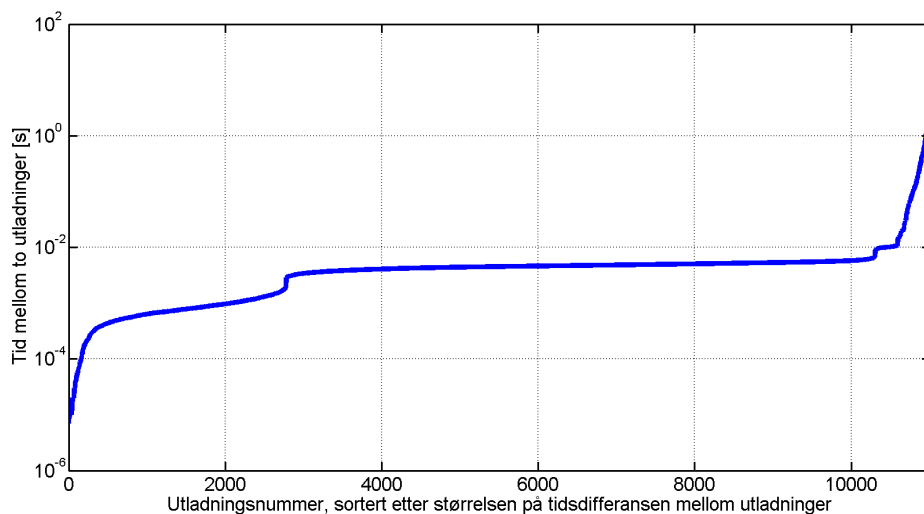
Pulssekvensanalyse, Kabelskjøt C, 100 Hz



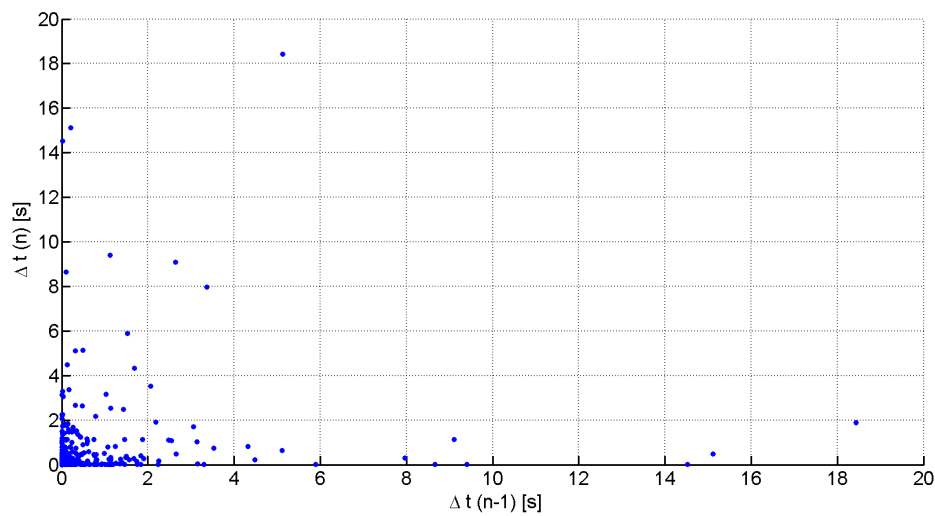
Figur C.96: Spenningsforskjell mellom utladninger, plottet etter prinsippet beskrevet i Kapittel 2.4.2. Målingene er fra Kabelskjøt C, utført ved 11,0 kV og 100 Hz. Måleperioden er på fem minutter.



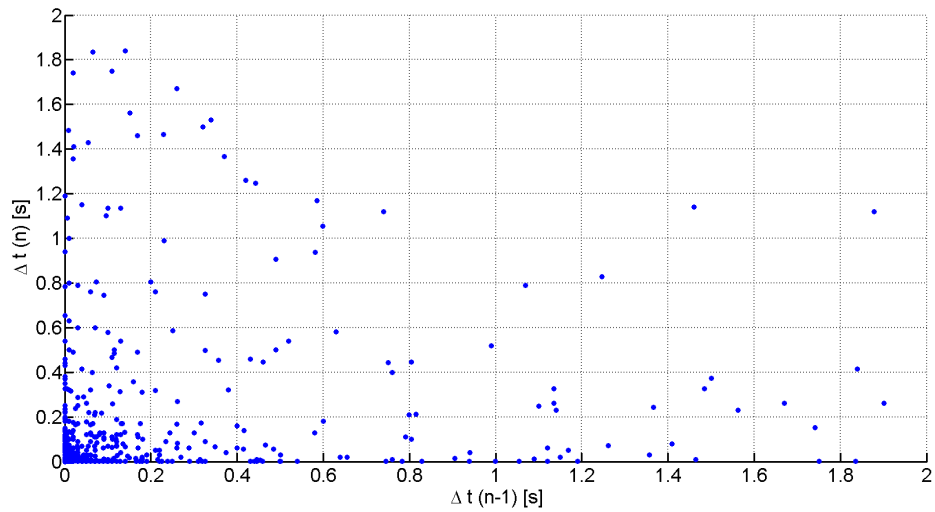
Figur C.97: Sortert spenningsendring mellom utladninger i Kabelskjøt C, ved 100 Hz.



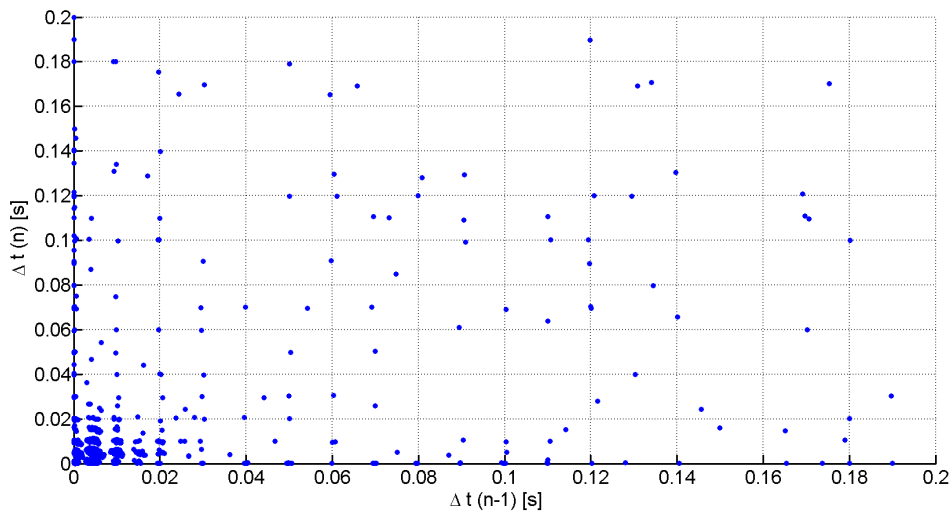
Figur C.98: Tidsforskjell mellom utladninger, plottet i stigende rekkefølge. Målingene er fra Kabelskjøt C, utført ved 11,0 kV og 100 Hz. Måleperioden er på fem minutter.



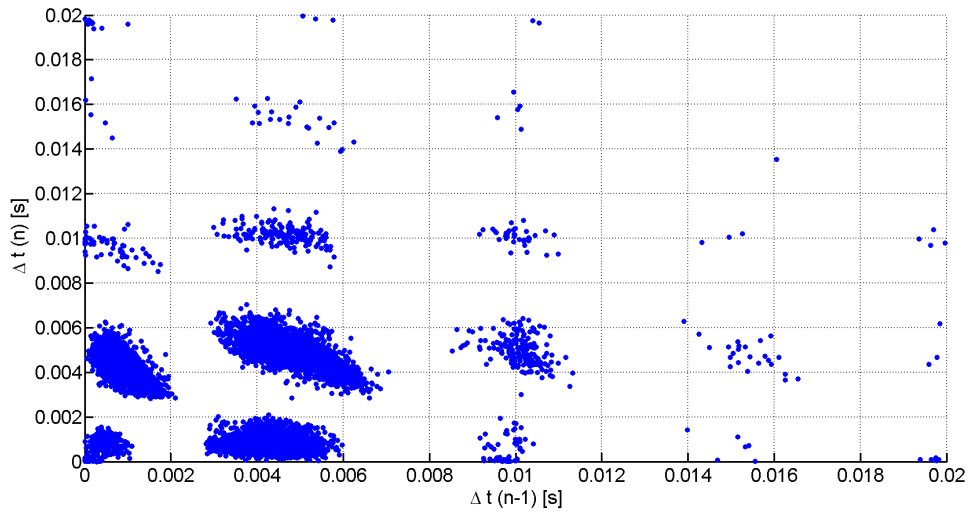
Figur C.99: Tidsforskjell mellom utladninger, plottet etter prinsippet beskrevet i Kapittel 2.4.2. Målingene er fra Kabelskjøt C, utført ved 11,0 kV og 100 Hz. Måleperioden er på fem minutter.



Figur C.100: Tidsforskjell mellom utladninger, plottet etter prinsippet beskrevet i Kapittel 2.4.2. Figuren viser det samme som Figur C.99, bare med verdiene som ligger innenfor verdien 2 på både x- og y-aksen. Målingene er fra Kabelskjøt C, utført ved 11,0 kV og 100 Hz. Måleperioden er på fem minutter.

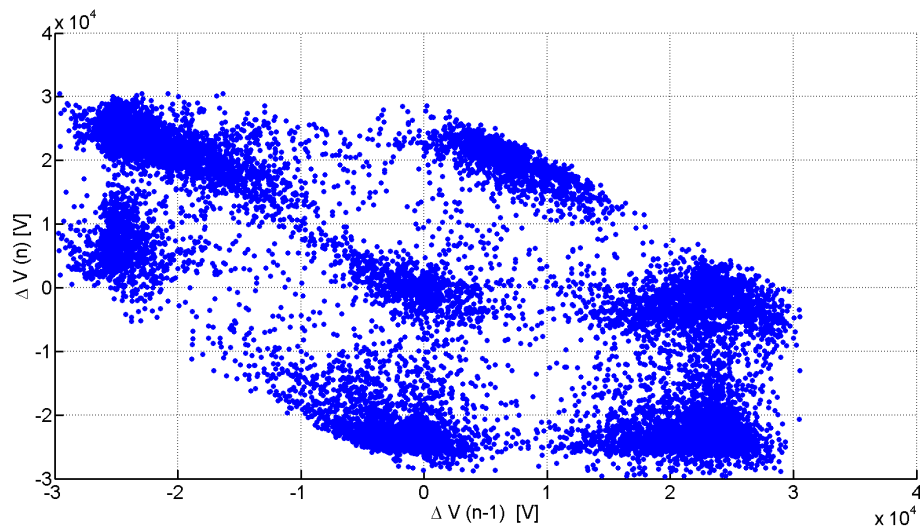


Figur C.101: Tidsforskjell mellom utladninger, plottet etter prinsippet beskrevet i Kapittel 2.4.2. Figuren viser det samme som Figur C.99, bare med verdiene som ligger innenfor verdien 0,2 på både x- og y-aksen. Målingene er fra Kabelskjøt C, utført ved 11,0 kV og 100 Hz. Måleperioden er på fem minutter.

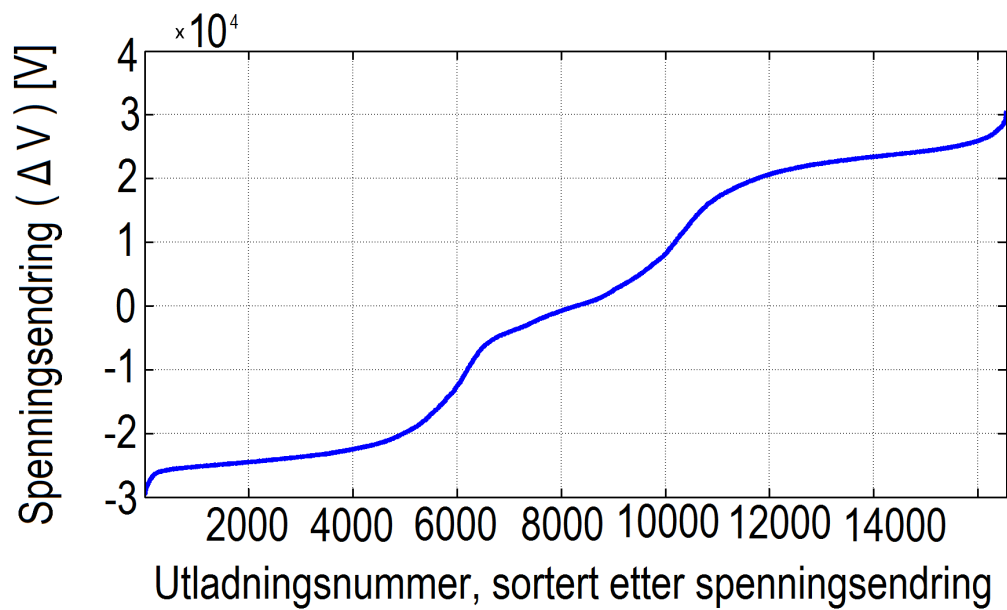


Figur C.102: Tidsforskjell mellom utladninger, plottet etter prinsippet beskrevet i Kapittel 2.4.2. Figuren viser det samme som Figur C.99, bare med verdiene som ligger innenfor verdien 0,02 på både x- og y-aksen. Målingene er fra Kabelskjøt C, utført ved 11,0 kV og 100 Hz. Måleperioden er på fem minutter.

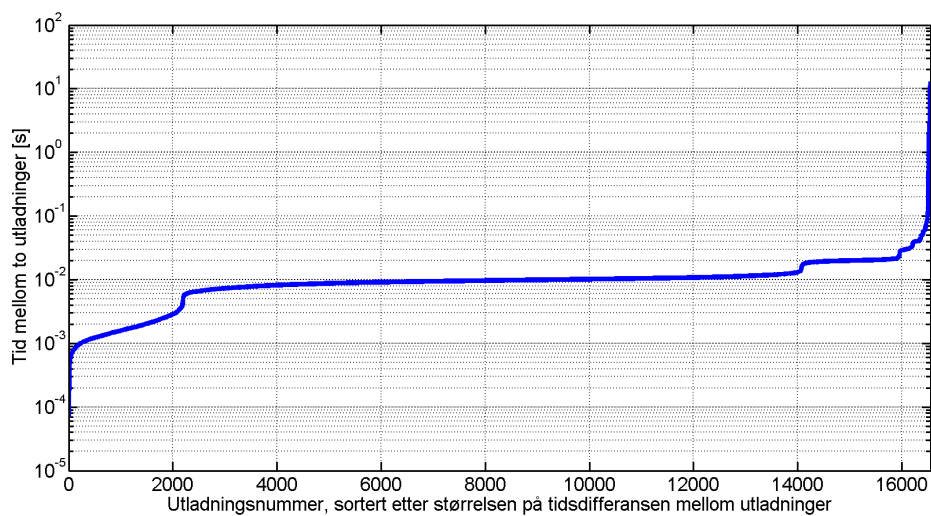
Pulssekvensanalyse, Kabelskjøt C, 50,2 Hz



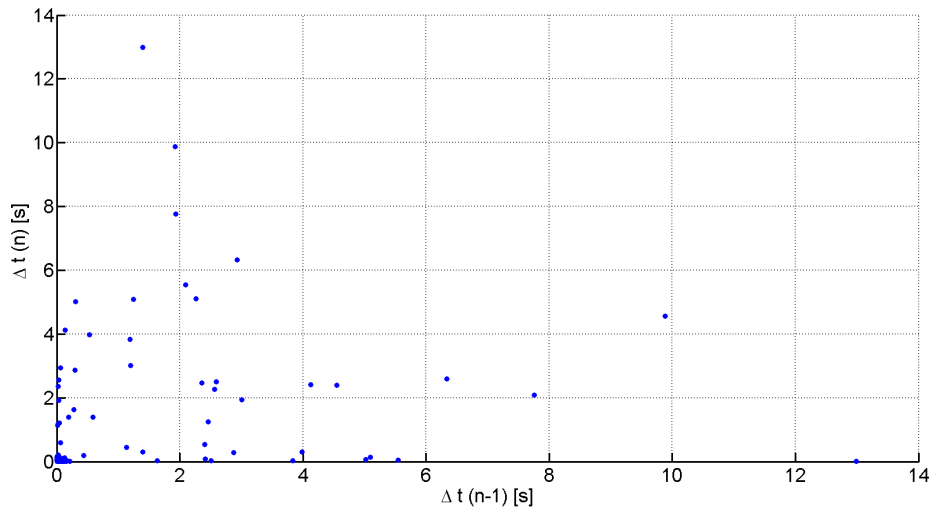
Figur C.103: Spenningsforskjell mellom utladninger, plottet etter prinsippet beskrevet i Kapittel 2.4.2. Målingene er fra Kabelskjøt C, utført ved 11,5 kV og 50,2 Hz. Måleperioden er på fem minutter.



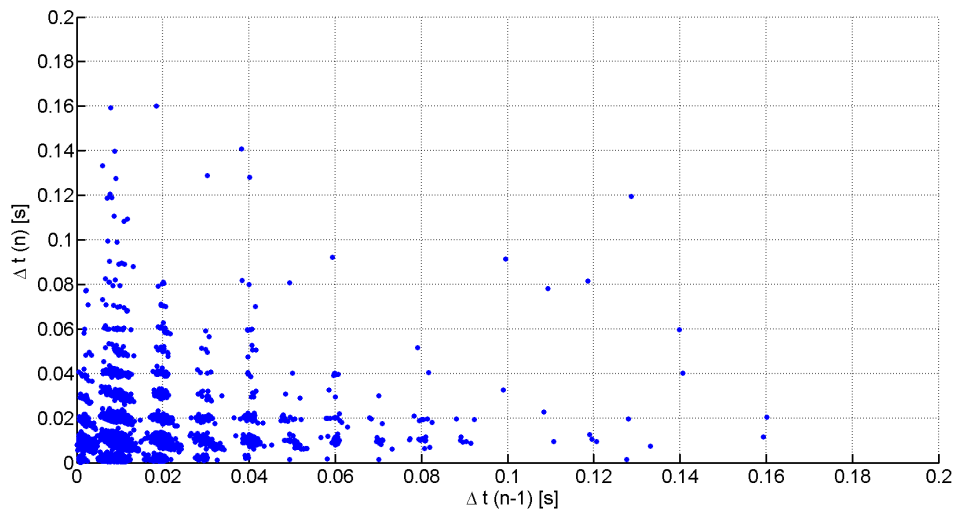
Figur C.104: Sortert spenningsendring mellom utladninger i Kabelskjøt C, ved 50,2 Hz.



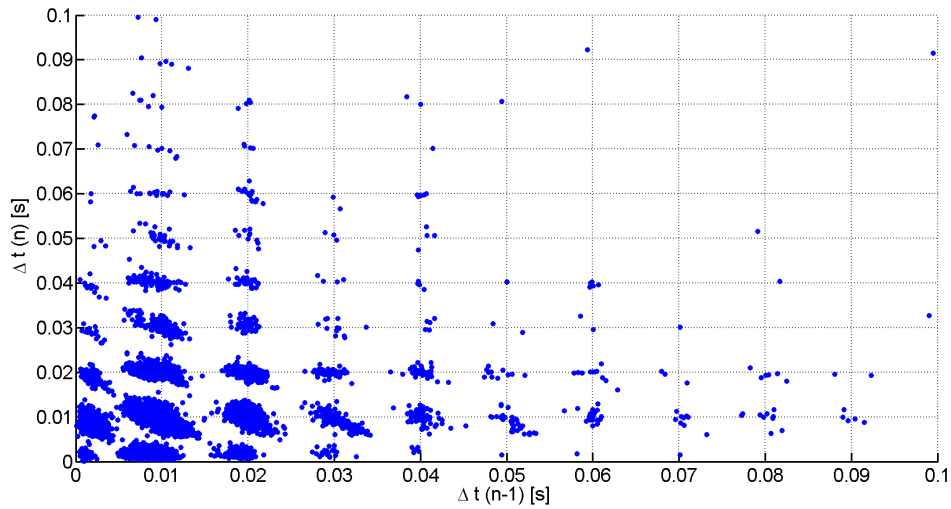
Figur C.105: Tidsforskjell mellom utladninger, plottet i stigende rekkefølge. Målingene er fra Kabelskjøt C, utført ved 11,5 kV og 50,2 Hz. Måleperioden er på fem minutter.



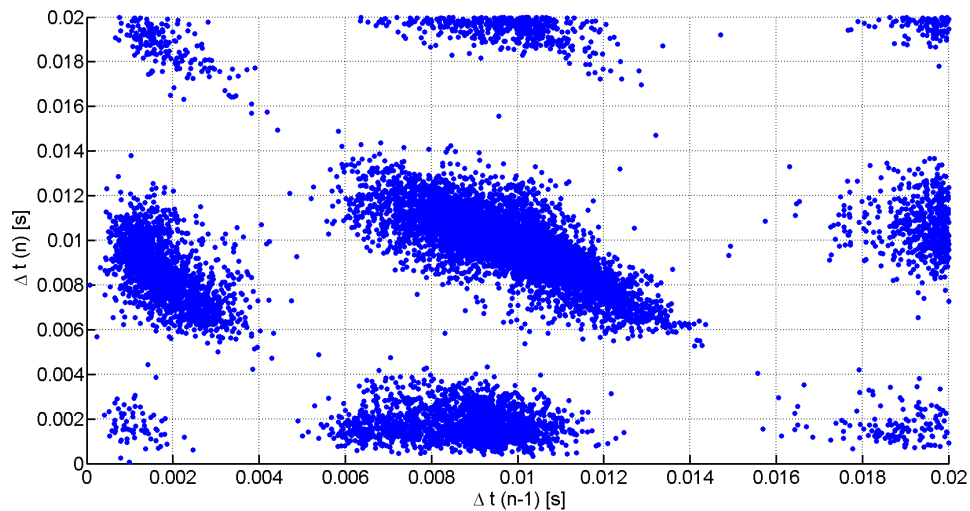
Figur C.106: Tidsforskjell mellom utladninger, plottet etter prinsippet beskrevet i Kapittel 2.4.2. Målingene er fra Kabelskjøt C, utført ved 11,5 kV og 50,2 Hz. Måleperioden er på fem minutter.



Figur C.107: Tidsforskjell mellom utladninger, plottet etter prinsippet beskrevet i Kapittel 2.4.2. Figuren viser det samme som Figur C.106, bare med verdiene som ligger innenfor verdien 0,2 på både x- og y-aksen. Målingene er fra Kabelskjøt C, utført ved 11,5 kV og 50,2 Hz. Måleperioden er på fem minutter.

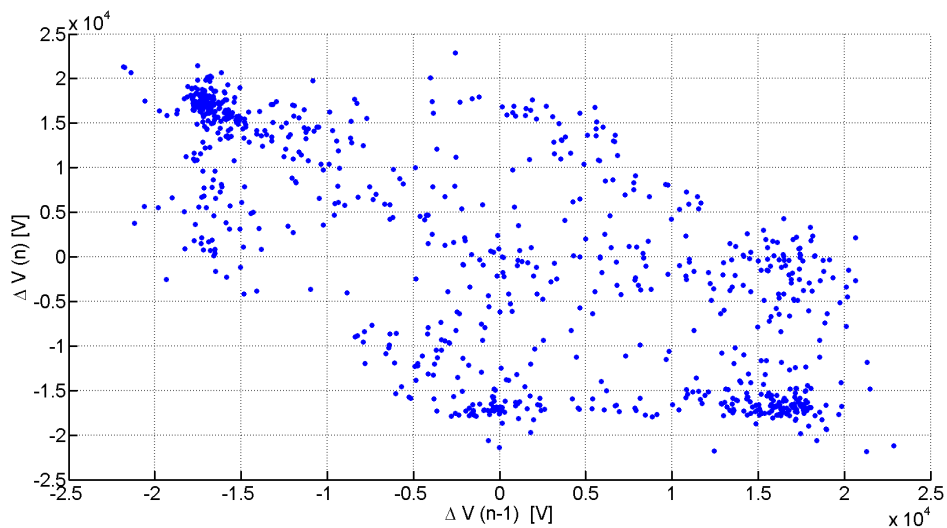


Figur C.108: Tidsforskjell mellom utladninger, plottet etter prinsippet beskrevet i Kapittel 2.4.2. Figuren viser det samme som Figur C.106, bare med verdiene som ligger innenfor verdien 0,1 på både x- og y-aksen. Målingene er fra Kabelskjøt C, utført ved 11,5 kV og 50,2 Hz. Måleperioden er på fem minutter.

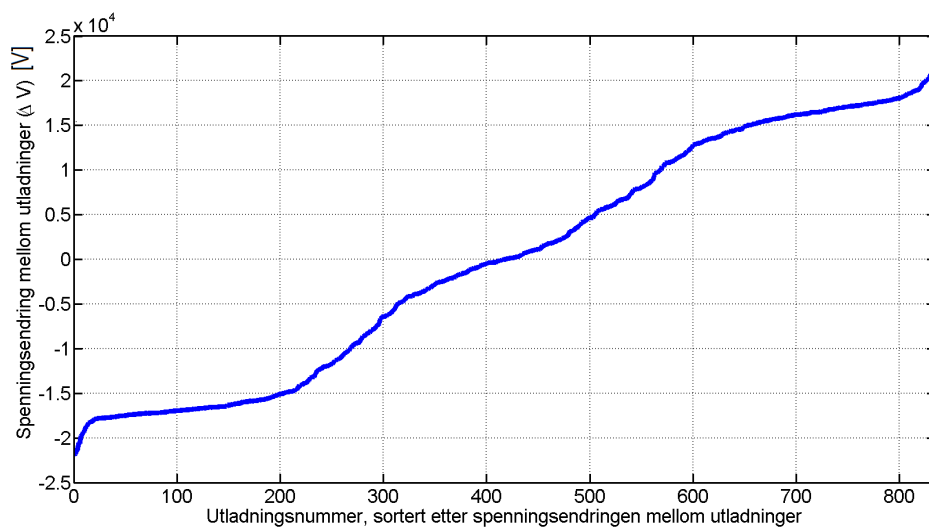


Figur C.109: Tidsforskjell mellom utladninger, plottet etter prinsippet beskrevet i Kapittel 2.4.2. Figuren viser det samme som Figur C.106, bare med verdiene som ligger innenfor verdien 0,02 på både x- og y-aksen. Målingene er fra Kabelskjøt C, utført ved 11,5 kV og 50,2 Hz. Måleperioden er på fem minutter.

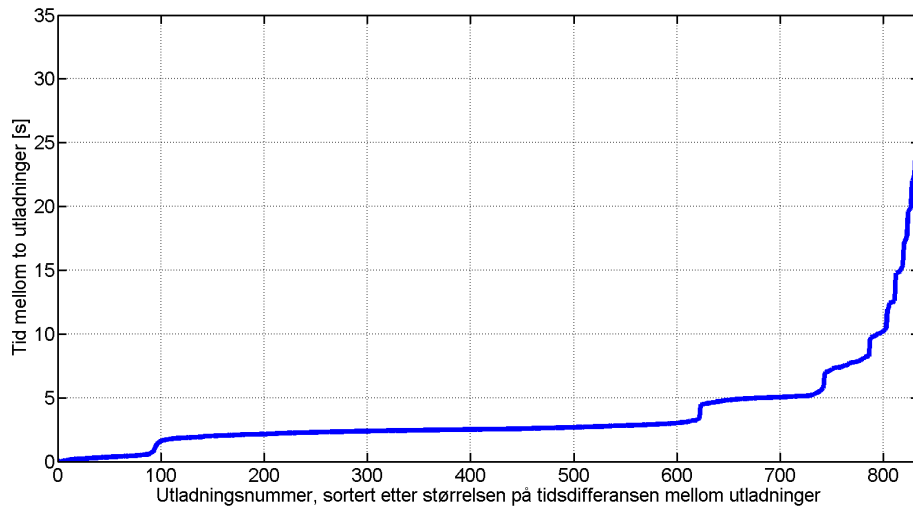
Pulssekvensanalyse, Kabelskjøt C, 0,2 Hz



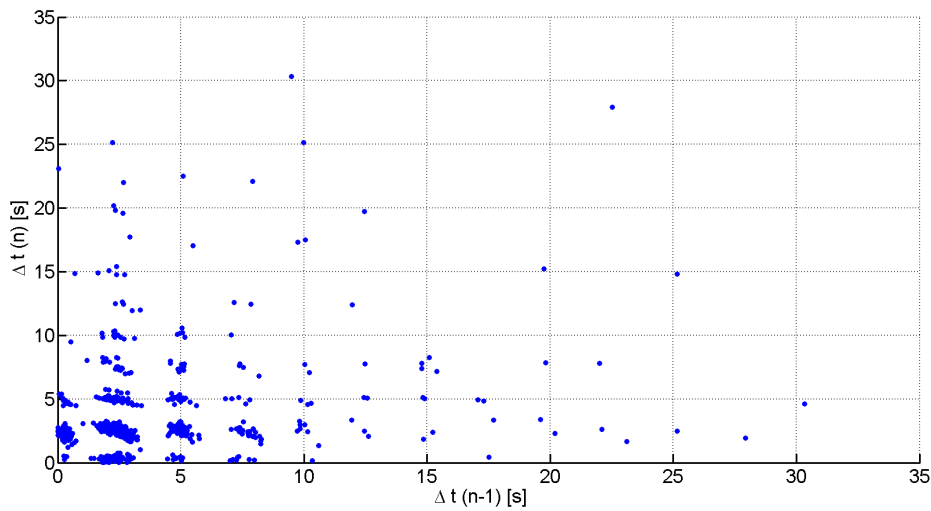
Figur C.110: Spenningsforskjell mellom utladninger, plottet etter prinsippet beskrevet i Kapittel 2.4.2. Målingene er fra Kabelskjøt C, utført ved 9,5 kV og 0,2 Hz. Måleperioden er på 50 minutter.



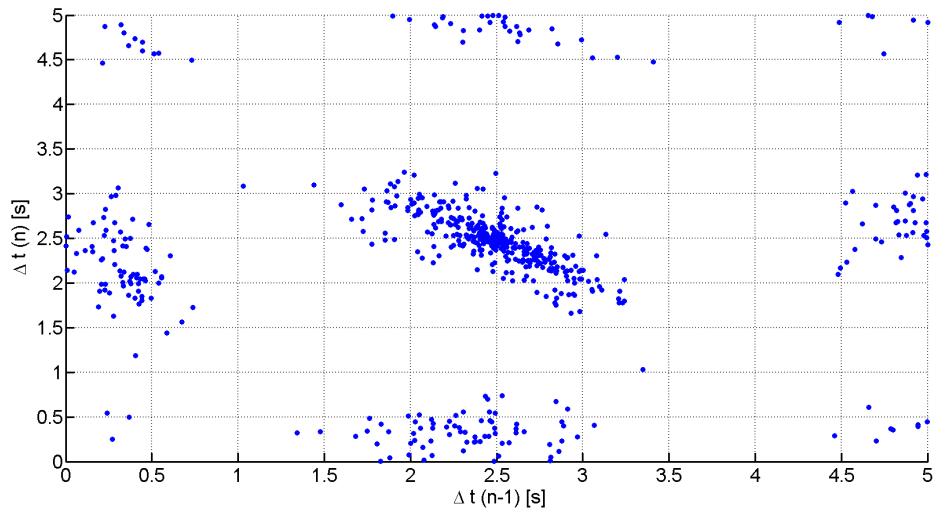
Figur C.111: Sortert spenningsendring mellom utladninger i Kabelskjøt C, ved 0,2 Hz.



Figur C.112: Tidsforskjell mellom utladninger, plottet i stigende rekkefølge. Målingene er fra Kabelskjøt C, utført ved 9,5 kV og 0,2 Hz. Måleperioden er på 50 minutter.

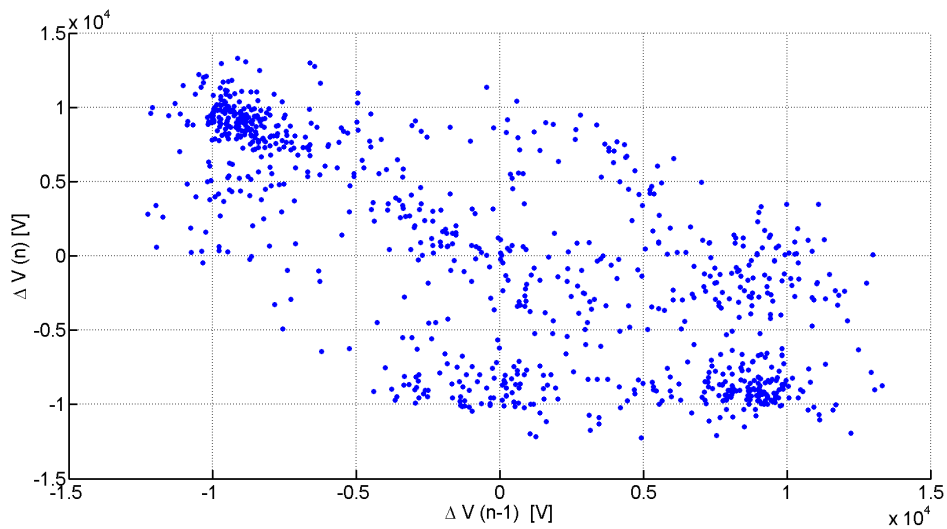


Figur C.113: Tidsforskjell mellom utladninger, plottet etter prinsippet beskrevet i Kapittel 2.4.2. Målingene er fra Kabelskjøt C, utført ved 9,5 kV og 0,2 Hz. Måleperioden er på 50 minutter.

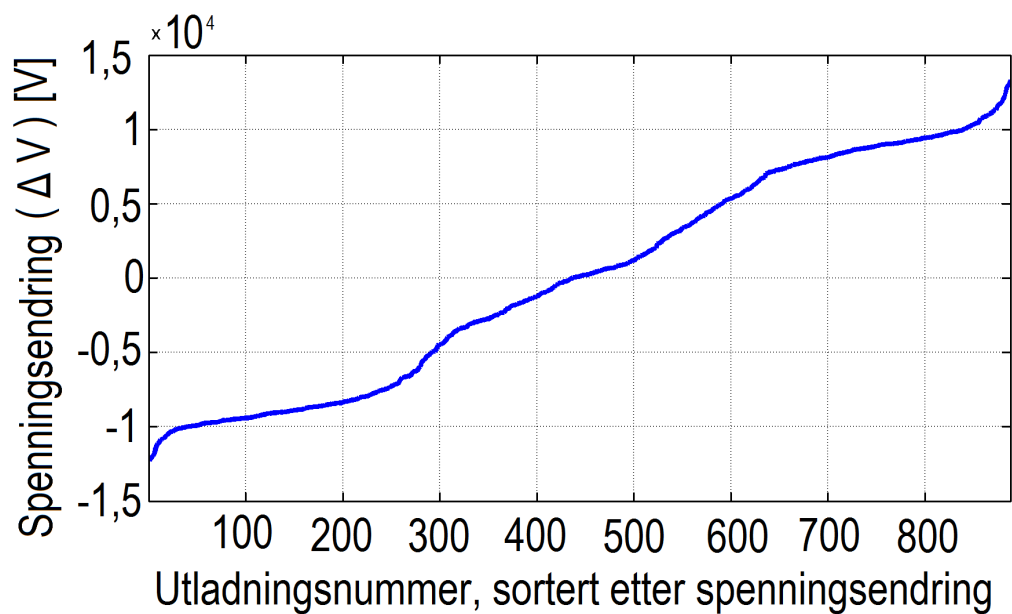


Figur C.114: Tidsforskjell mellom utladninger, plottet etter prinsippet beskrevet i Kapittel 2.4.2. Figuren viser det samme som Figur C.113, bare med verdiene som ligger innenfor verdien 5 på både x- og y-aksen. Målingene er fra Kabelskjøt C, utført ved 9,5 kV og 0,2 Hz. Måleperioden er på 50 minutter.

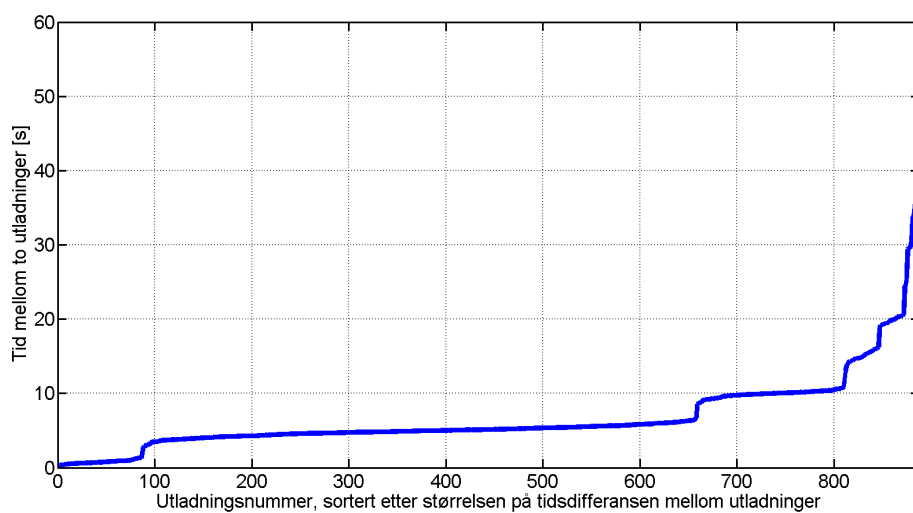
Pulssekvensanalyse, Kabelskjøt C, 0,1 Hz



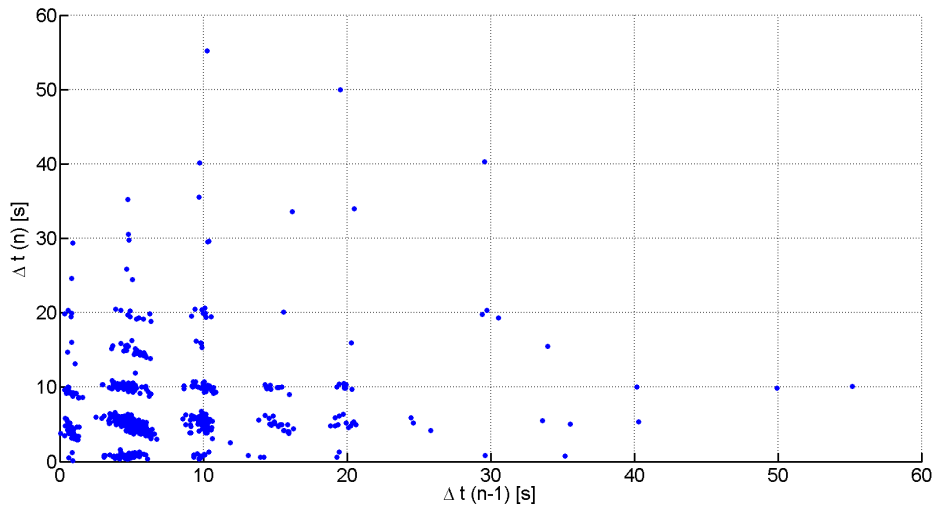
Figur C.115: Spenningsforskjell mellom utladninger, plottet etter prinsippet beskrevet i Kapittel 2.4.2. Målingene er fra Kabelskjøt C, utført ved 6,5 kV og 0,1 Hz. Måleperioden er på 100 minutter.



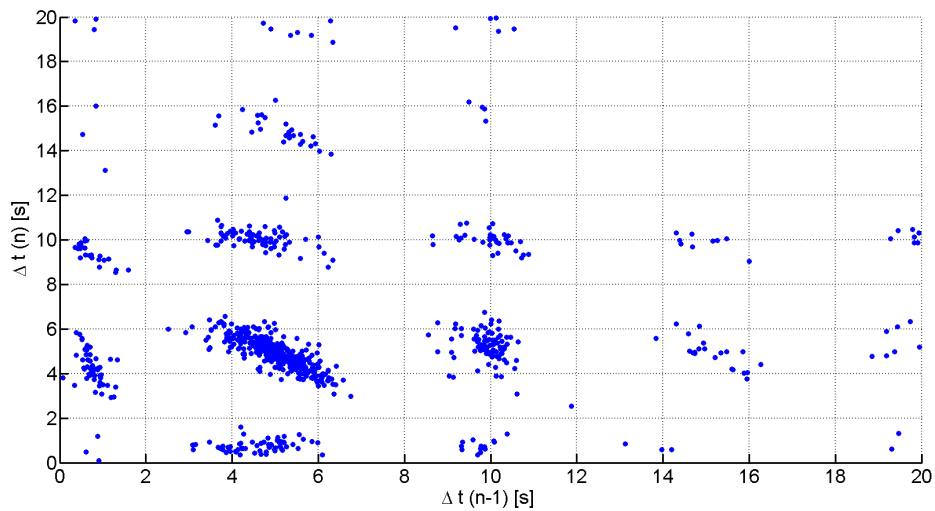
Figur C.116: Sortert spenningsendring mellom utladninger i Kabelskjøt C, ved 0,1 Hz.



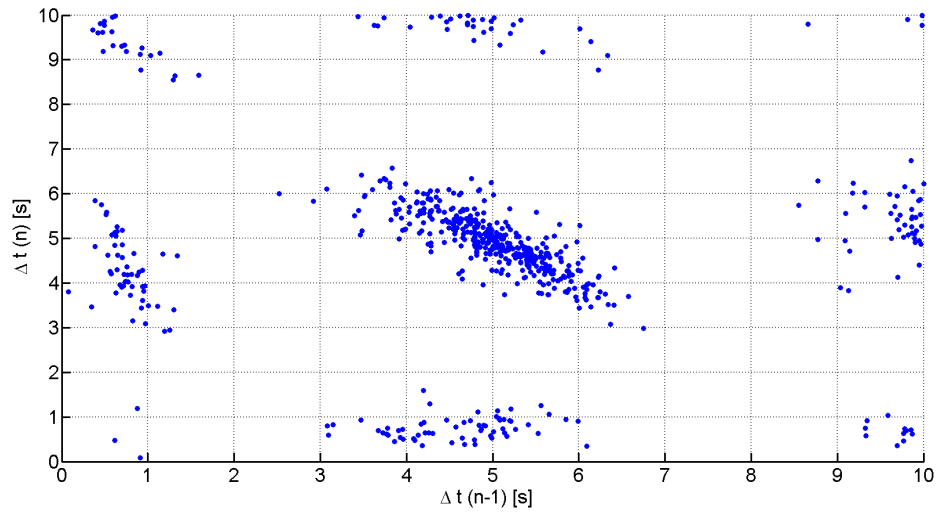
Figur C.117: Tidsforskjell mellom utladninger, plottet i stigende rekkefølge. Målingene er fra Kabelskjøt C, utført ved 6,5 kV og 0,1 Hz. Måleperioden er på 100 minutter.



Figur C.118: Tidsforskjell mellom utladninger, plottet etter prinsippet beskrevet i Kapittel 2.4.2. Målingene er fra Kabelskjøt C, utført ved 6,5 kV og 0,1 Hz. Måleperioden er på 100 minutter.



Figur C.119: Tidsforskjell mellom utladninger, plottet etter prinsippet beskrevet i Kapittel 2.4.2. Figuren viser det samme som Figur C.118, bare med verdiene som ligger innenfor verdien 20 på både x- og y-aksen. Målingene er fra Kabelskjøt C, utført ved 6,5 kV og 0,1 Hz. Måleperioden er på 100 minutter.

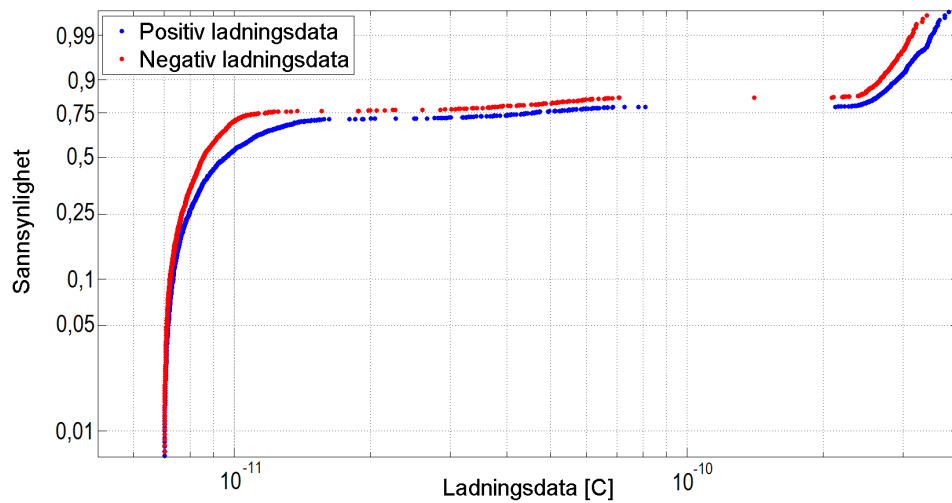


Figur C.120: Tidsforskjell mellom utladninger, plottet etter prinsippet beskrevet i Kapittel 2.4.2. Figuren viser det samme som Figur C.118, bare med verdiene som ligger innenfor verdien 10 på både x- og y-aksen. Målingene er fra Kabelskjøt C, utført ved 6,5 kV og 0,1 Hz. Måleperioden er på 100 minutter.

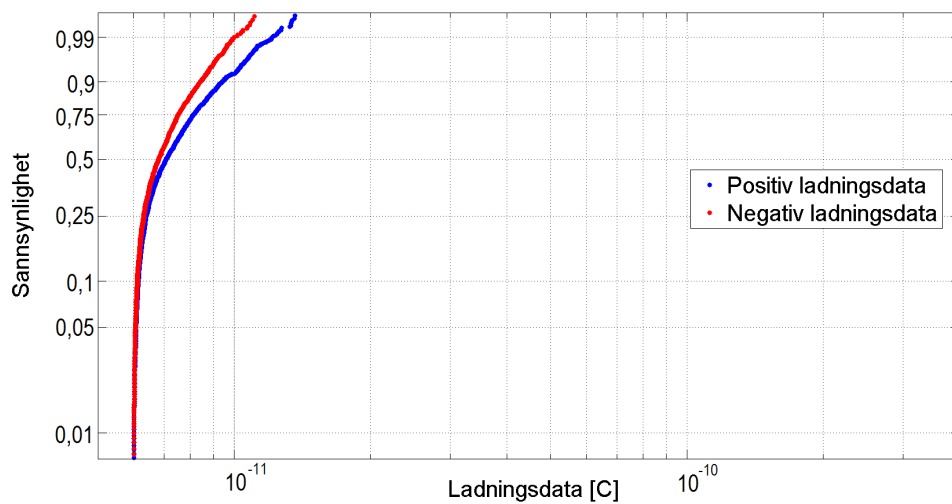
C.5 Weibull

C.5.1 Weibull-fordeling, positive og negative utladninger

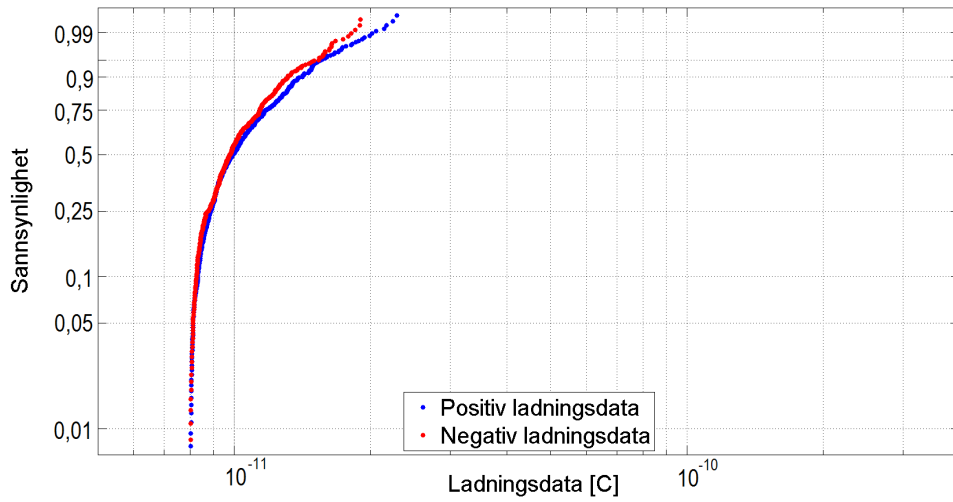
Weibull, positiv og negativ fordeling, Kabelskjøt A



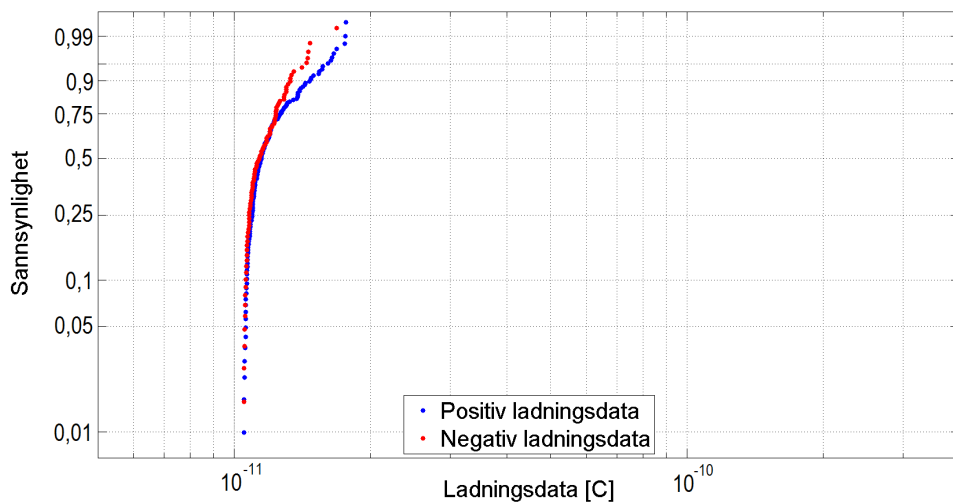
Figur C.121: Positiv og negativ ladningsfordeling, Kabelskjøt A, 100 Hz.



Figur C.122: Positiv og negativ ladningsfordeling, Kabelskjøt A, 50,2 Hz.

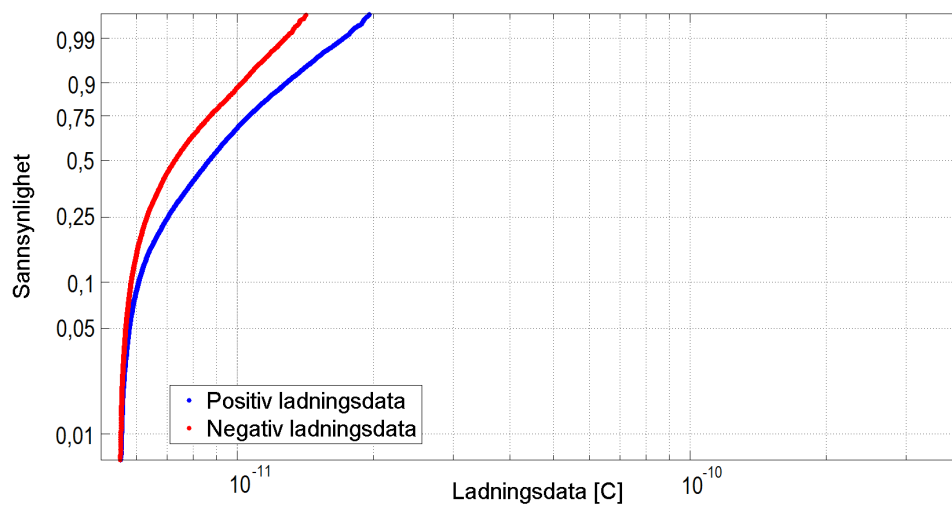


Figur C.123: Positiv og negativ ladningsfordeling, Kabelskjøt A, 0,2 Hz.

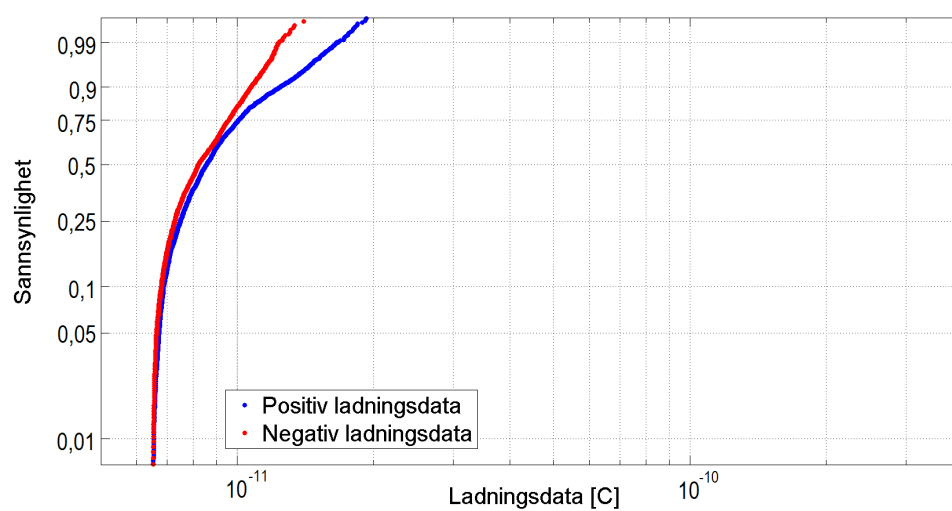


Figur C.124: Positiv og negativ ladningsfordeling, Kabelskjøt A, 0,1 Hz.

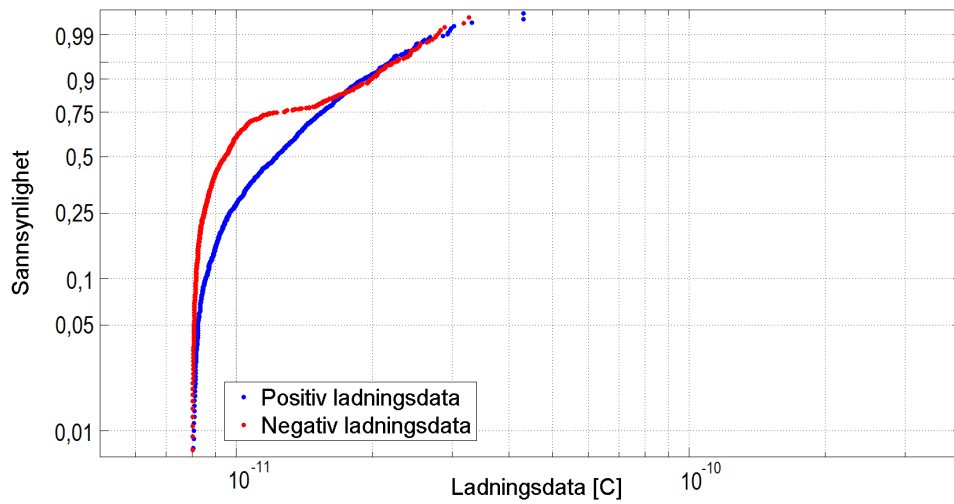
Weibull, positiv og negativ fordeling, Kabelskjøt B



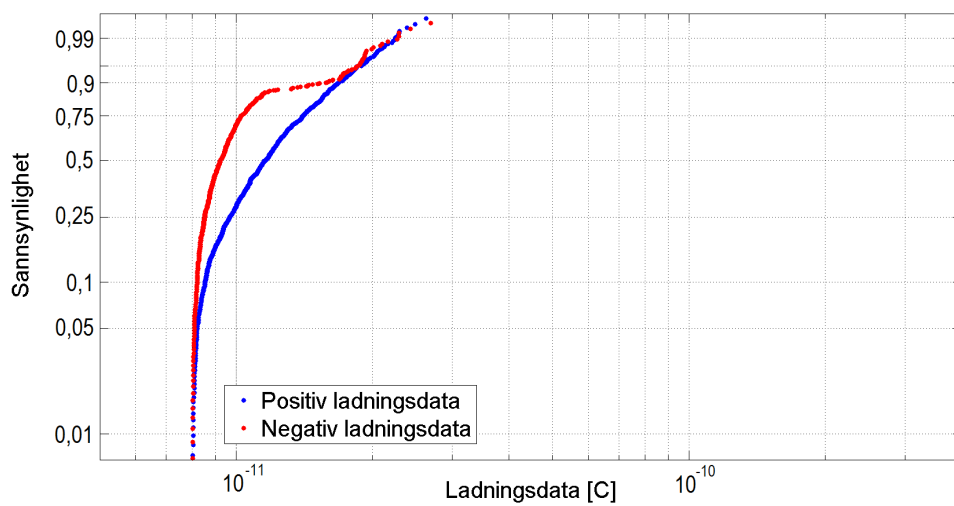
Figur C.125: Positiv og negativ ladningsfordeling, Kabelskjøt B, 100 Hz.



Figur C.126: Positiv og negativ ladningsfordeling, Kabelskjøt B, 50,2 Hz.

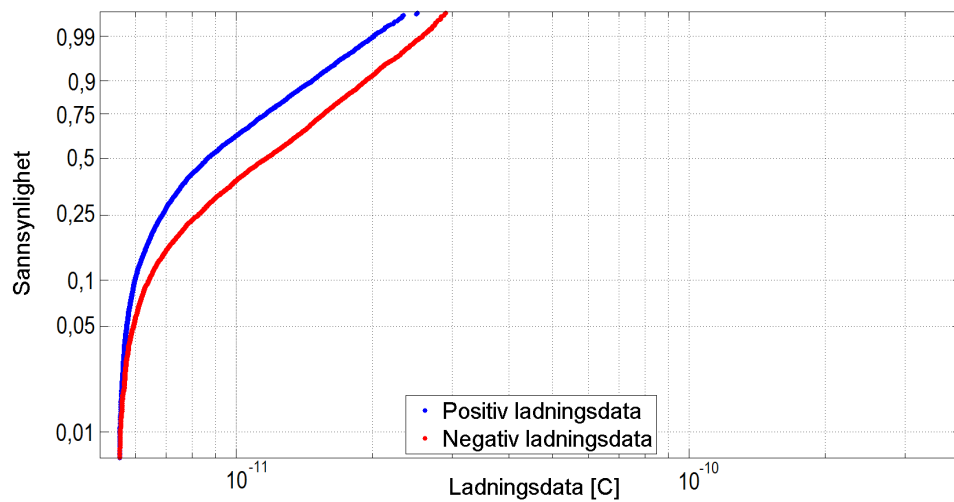


Figur C.127: Positiv og negativ ladningsfordeling, Kabelskjøt B, 0,2 Hz.

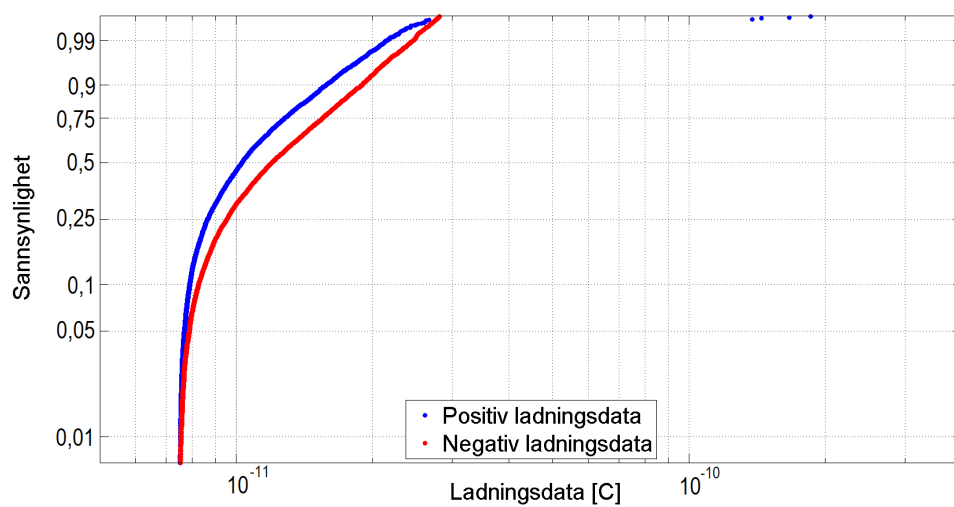


Figur C.128: Positiv og negativ ladningsfordeling, Kabelskjøt B, 0,1 Hz.

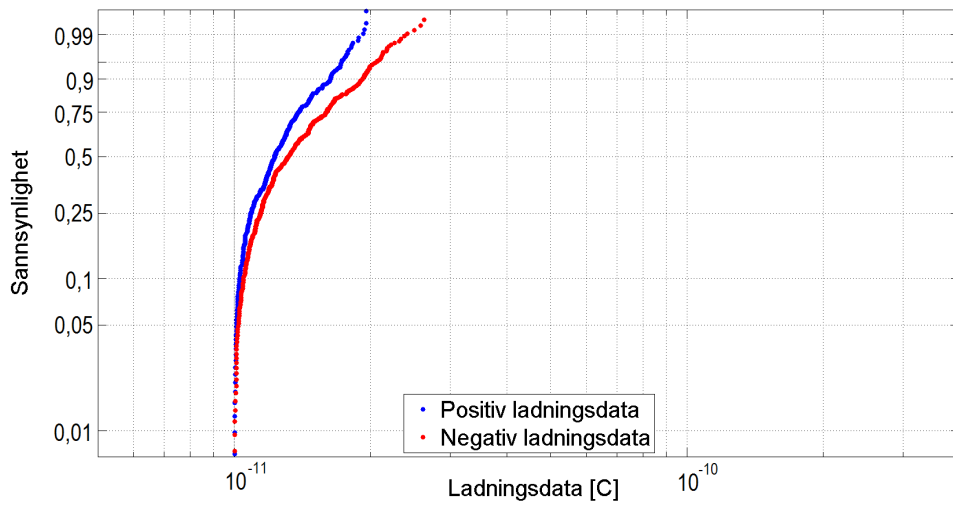
Weibull, positiv og negativ fordeling, Kabelskjøt C



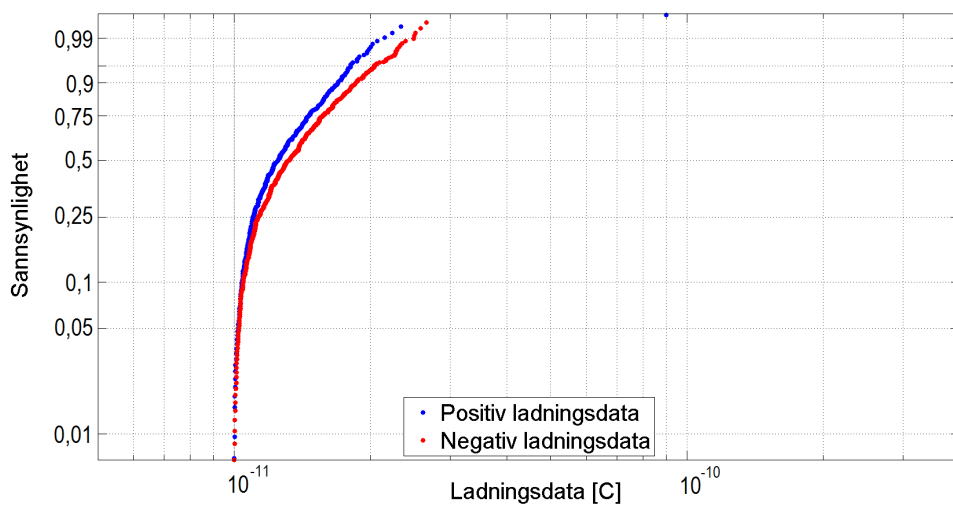
Figur C.129: Positiv og negativ ladningsfordeling, Kabelskjøt C, 100 Hz.



Figur C.130: Positiv og negativ ladningsfordeling, Kabelskjøt C, 50,2 Hz.

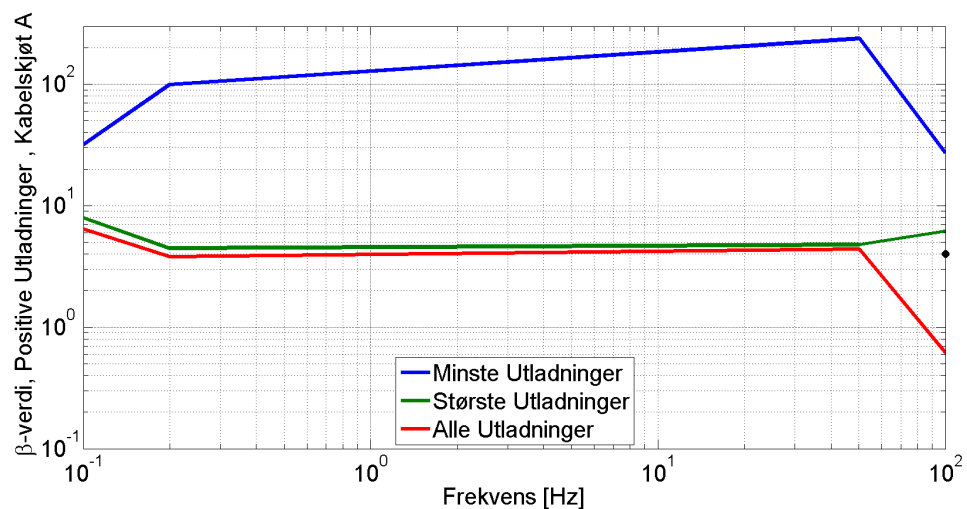


Figur C.131: Positiv og negativ ladningsfordeling, Kabelskjøt C, 0,2 Hz.

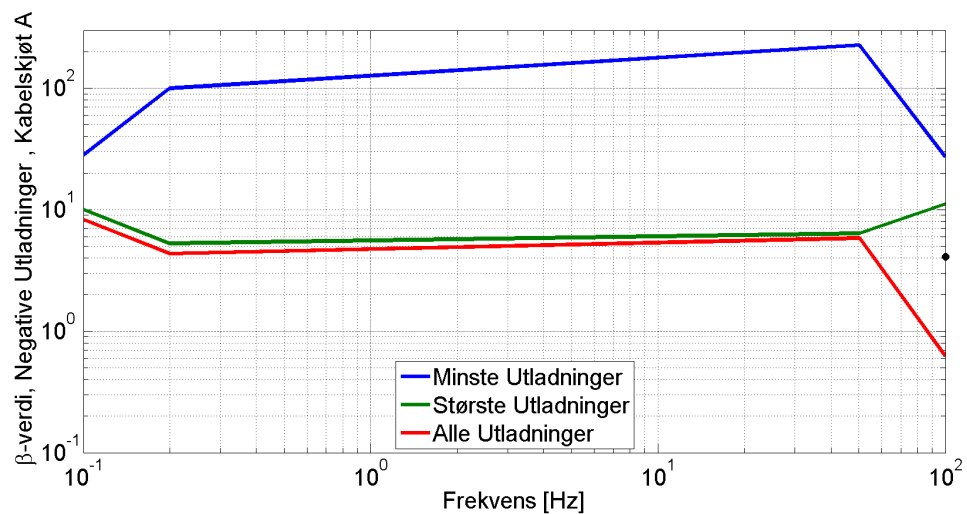


Figur C.132: Positiv og negativ ladningsfordeling, Kabelskjøt C, 0,1 Hz.

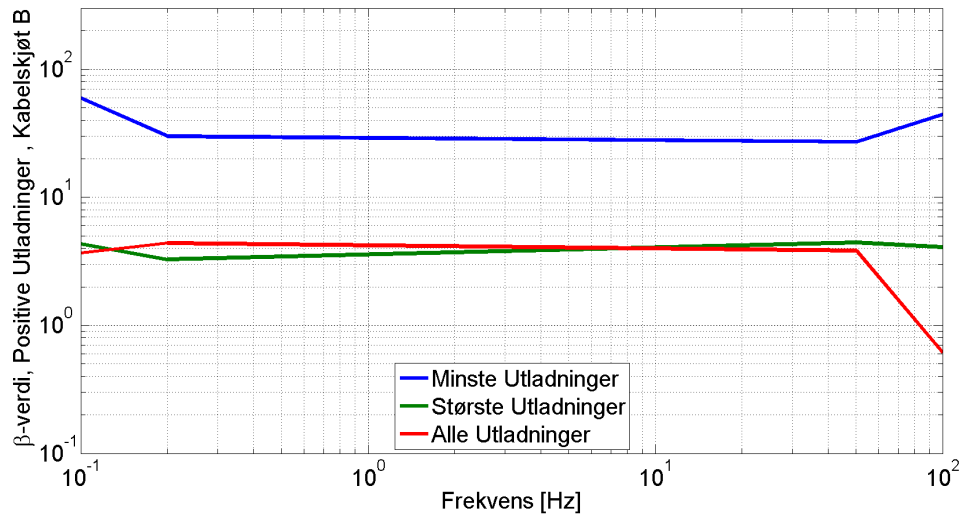
C.5.2 Weibull, Skala- og formfaktor, Samlet og separert



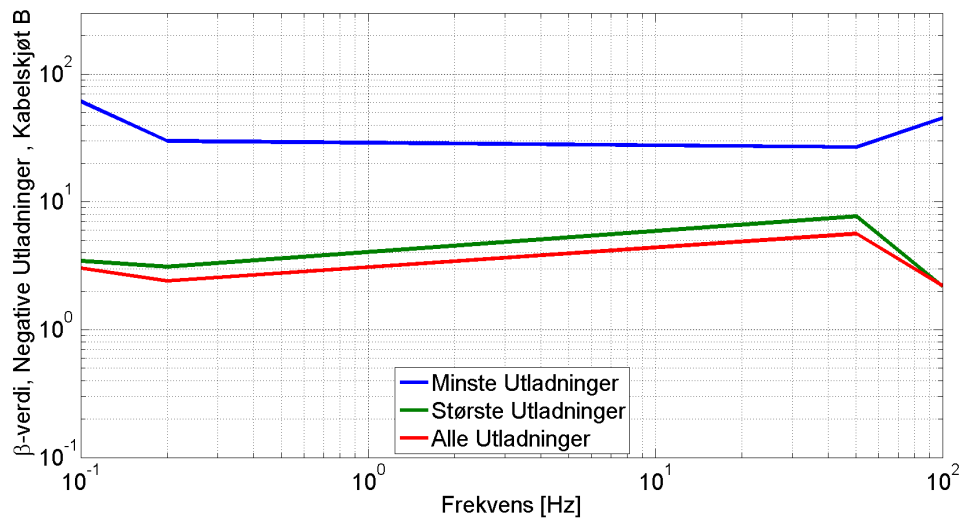
Figur C.133: β - verdi for positive utladninger i Kabelskjøt A. Den røde grafen viser β -verdien for alle utladningene samlet. Den blå grafen viser β -verdien til de minste utladningene, mens den grønne viser for de største.



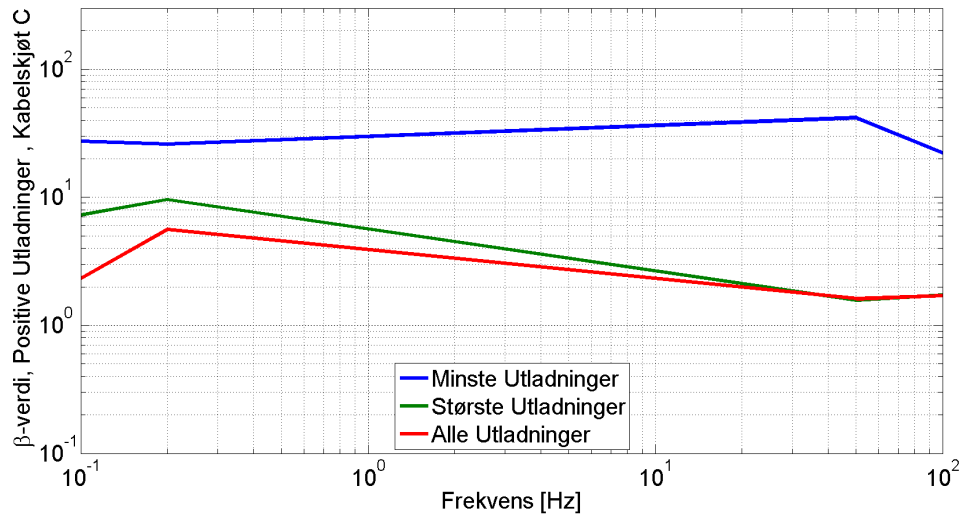
Figur C.134: β - verdi for negative utladninger i Kabelskjøt A. Den røde grafen viser β -verdien for alle utladningene samlet. Den blå grafen viser β -verdien til de minste utladningene, mens den grønne viser for de største.



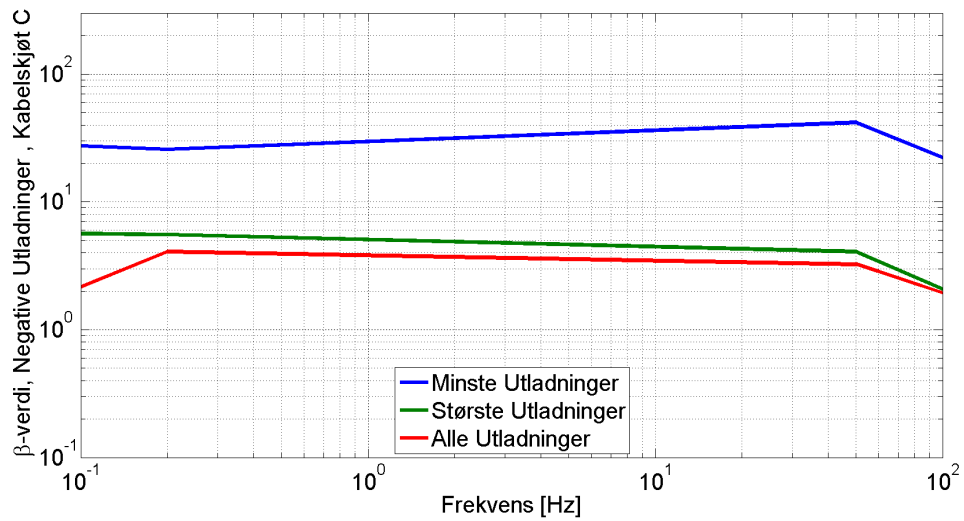
Figur C.135: β - verdi for positive utladninger i Kabelskjøt B. Den røde grafen viser β -verdien for alle utladningene samlet. Den blå grafen viser β -verdien til de minste utladningene, mens den grønne viser for de største.



Figur C.136: β - verdi for negative utladninger i Kabelskjøt B. Den røde grafen viser β -verdien for alle utladningene samlet. Den blå grafen viser β -verdien til de minste utladningene, mens den grønne viser for de største.



Figur C.137: β - verdi for positive utladninger i Kabelskjøt C. Den røde grafen viser β -verdien for alle utladningene samlet. Den blå grafen viser β -verdien til de minste utladningene, mens den grønne viser for de største.



Figur C.138: β - verdi for negative utladninger i Kabelskjøt C. Den røde grafen viser β -verdien for alle utladningene samlet. Den blå grafen viser β -verdien til de minste utladningene, mens den grønne viser for de største.

Tabell C.2: Weibull, α - og β -verdi, for utladninger i Kabelskjøt A. Utladningene har blitt separert, hvor de minste utladningene blir kalt små, og de største blir kalt store. Hva som defineres som store og små utladninger oppgis også i tabellen, i tillegg til antall utladninger i de forskjellige tilfellene. Senket p og n betyr henholdsvis positive og negative utladninger.

	100 Hz	50,2 Hz	0,2 Hz	0,1 Hz
α_p , Små Utladninger [pC]	7,5921	6,0634	8,1646	11,223
β_p , Små Utladninger	27,4084	240,0494	99,8430	32,0942
α_n , Små Utladninger [pC]	7,5973	6,0646	8,1959	11,175
β_n , Små Utladninger	27,4192	227,4282	100,2118	28,2348
α_p , Store Utladninger [pC]	306,38	9,0532	13,651	14,426
β_p , Store Utladninger	6,2117	4,8113	4,4839	8,0203
α_n , Store Utladninger [pC]	285,02	8,3365	13,125	13,476
β_n , Store Utladninger	11,2071	6,4061	5,2983	10,1468
Små Utladninger [pC]	< 8,0	< 6,1	< 8,3	< 11,8
Store Utladninger [pC]	> 200,0	> 7,0	> 10,0	> 11,8
Antall Store, Positive Utladninger	404	1121	290	61
Antall Store, Negative Utladninger	228	633	185	36
Antall Store Utladninger Totalt	632	1754	475	97
Antall Små, Positive Utladninger	484	149	54	91
Antall Små, Negative Utladninger	458	123	50	58
Antall Små Utladninger Totalt	942	272	104	149

Tabell C.3: Weibull, α - og β -verdi, for utladninger i Kabelskjøt B. Utladningene har blitt separert, hvor de minste utladningene blir kalt små, og de største blir kalt store. Hva som defineres som store og små utladninger oppgis også i tabellen, i tillegg til antall utladninger i de forskjellige tilfellene. Senket p og n betyr henholdsvis positive og negative utladninger.

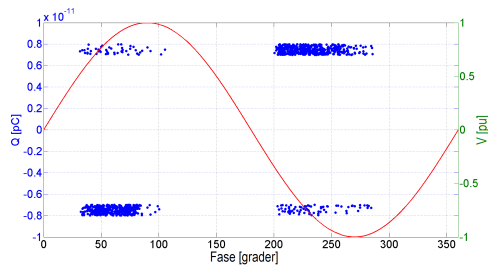
	100 Hz	50,2 Hz	0,2 Hz	0,1 Hz
α_p , Små Utladninger [pC]	5,8195	7,1326	8,6012	8,2864
β_p , Små Utladninger	44,4730	27,2708	30,1831	59,8058
α_n , Små Utladninger [pC]	5,8262	7,1227	8,5587	8,3064
β_n , Små Utladninger	45,4317	26,9799	30,0504	61,5676
α_p , Store Utladninger [pC]	11,037	11,218	16,508	14,839
β_p , Store Utladninger	4,1037	4,4499	3,2905	4,3590
α_n , Store Utladninger [pC]	9,7190	10,164	18,142	15,273
β_n , Store Utladninger	2,1887	7,7596	3,1320	3,4689
Små Utladninger [pC]	< 6,0	< 7,5	< 9,0	< 8,5
Store Utladninger [pC]	> 7,0	> 8,0	> 10,0	> 10,0
Antall Store, Positive Utladninger	9787	2127	606	547
Antall Store, Negative Utladninger	4371	790	236	152
Antall Store Utladninger Totalt	14158	2917	842	699
Antall Små, Positive Utladninger	1152	860	133	71
Antall Små, Negative Utladninger	1167	444	247	121
Antall Små Utladninger Totalt	2319	1304	380	192

Tabell C.4: Weibull, α - og β -verdi, for utladninger i Kabelskjøt C. Utladningene har blitt separert, hvor de minste utladningene blir kalt små, og de største blir kalt store. Hva som defineres som store og små utladninger oppgis også i tabellen, i tillegg til antall utladninger i de forskjellige tilfellene. Senket p og n betyr henholdsvis positive og negative utladninger.

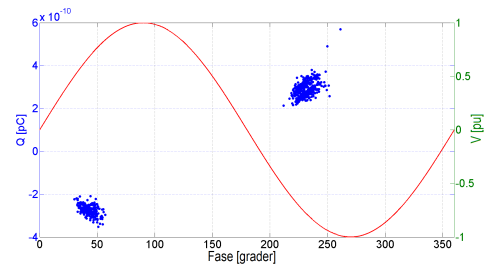
	100 Hz	50,2 Hz	0,2 Hz	0,1 Hz
α_p , Små Utladninger [pC]	6,1173	7,9336	10,820	10,923
β_p , Små Utladninger	22,3075	42,0256	26,0799	27,5983
α_n , Små Utladninger [pC]	6,1113	7,9437	10,930	10,908
β_n , Små Utladninger	22,2968	41,9670	25,9419	27,6084
α_p , Store Utladninger [pC]	14,368	15,584	16,363	16,859
β_p , Store Utladninger	1,7350	1,5794	9,6709	7,3607
α_n , Store Utladninger [pC]	16,367	16,191	18,157	17,906
β_n , Store Utladninger	2,0845	4,0987	5,5704	5,6808
Små Utladninger [pC]	< 6,5	< 8,2	< 11,5	< 11,5
Store Utladninger [pC]	> 9,0	> 10,0	> 13,5	> 13,5
Antall Store, Positive Utladninger	2620	4009	106	133
Antall Store, Negative Utladninger	3710	6363	220	247
Antall Store Utladninger Totalt	6330	10372	326	380
Antall Små, Positive Utladninger	1072	1226	123	125
Antall Små, Negative Utladninger	582	847	127	144
Antall Små Utladninger Totalt	1654	2073	250	269

C.5.3 Weibull-analyse, PRPDA-plot

Kabelskjøt A

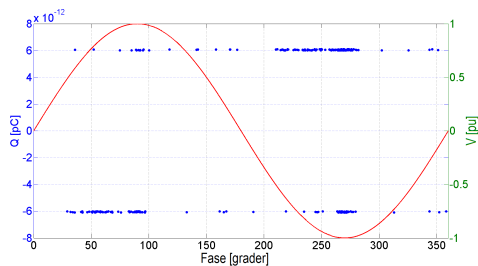


(a) Små utladninger (< 8,0 pC)

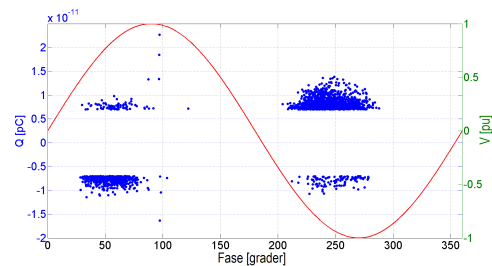


(b) Store utladninger (> 200 pC)

Figur C.139: PRPDA-plot av små og store utladninger, separert i Weibull-analyse. Målingene er fra Kabelskjøt A, ved 100 Hz.

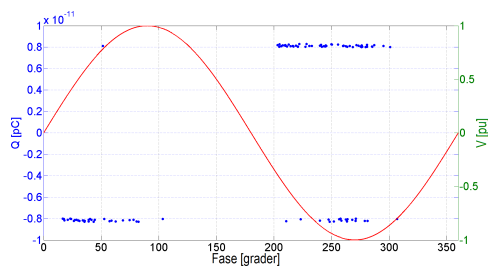


(a) Små utladninger (< 6,1 pC)

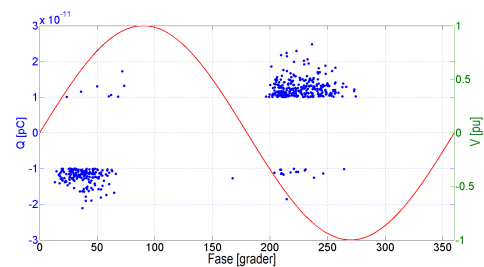


(b) Store utladninger (> 7,0 pC)

Figur C.140: PRPDA-plot av små og store utladninger, separert i Weibull-analyse. Målingene er fra Kabelskjøt A, ved 50,2 Hz.

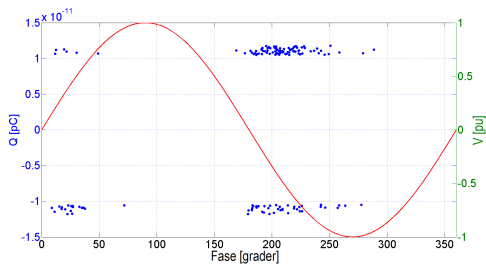


(a) Små utladninger (< 8,3 pC)

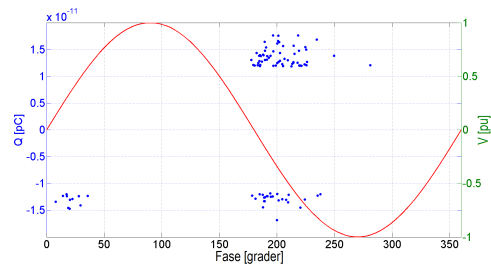


(b) Store utladninger (> 10,0 pC)

Figur C.141: PRPDA-plot av små og store utladninger, separert i Weibull-analyse. Målingene er fra Kabelskjøt A, ved 0,2 Hz.



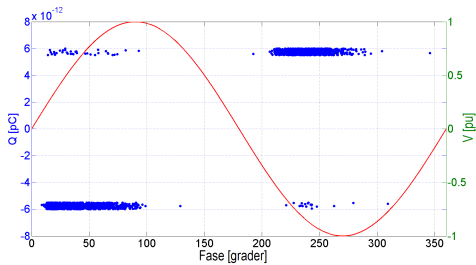
(a) Små utladninger (< 11,8 pC)



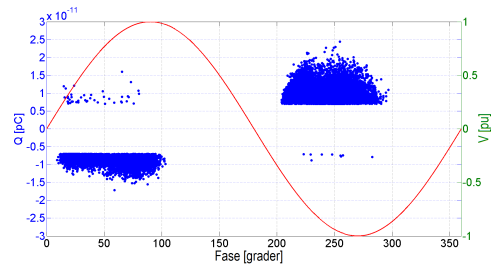
(b) Store utladninger (> 11,8 pC)

Figur C.142: PRPDA-plot av små og store utladninger, separert i Weibull-analyse. Målingene er fra Kabelskjøt A, ved 0,1 Hz.

Kabelskjøt B

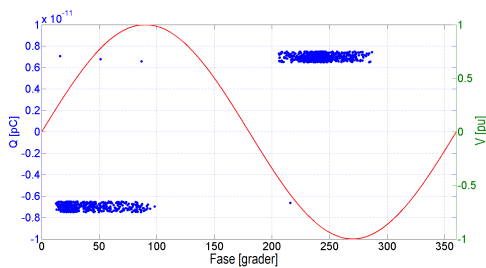


(a) Små utladninger (< 6,0 pC)

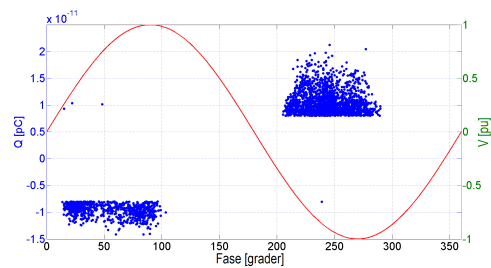


(b) Store utladninger (> 7,0 pC)

Figur C.143: PRPDA-plot av små og store utladninger, separert i Weibull-analyse. Målingene er fra Kabelskjøt B, ved 100 Hz.

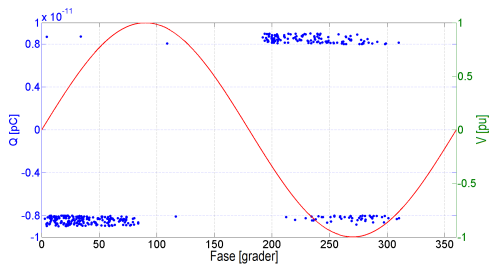


(a) Små utladninger (< 7,5 pC)

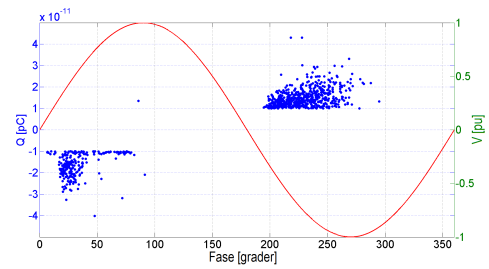


(b) Store utladninger (> 8,0 pC)

Figur C.144: PRPDA-plot av små og store utladninger, separert i Weibull-analyse. Målingene er fra Kabelskjøt B, ved 50,2 Hz.

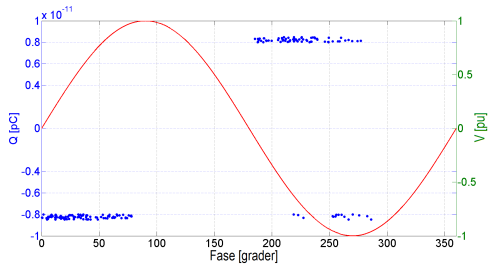


(a) Små utladninger (< 9,0 pC)

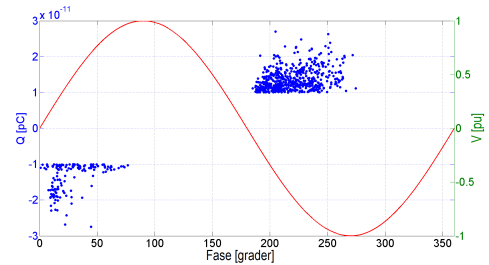


(b) Store utladninger (> 10,0 pC)

Figur C.145: PRPDA-plot av små og store utladninger, separert i Weibull-analyse. Målingene er fra Kabelskjøt B, ved 0,2 Hz.



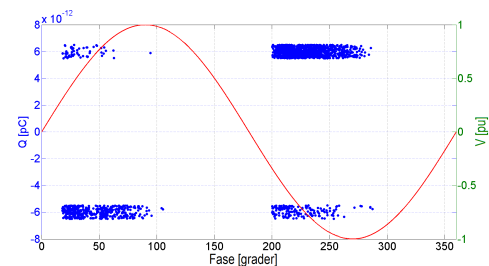
(a) Små utladninger (< 8,5 pC)



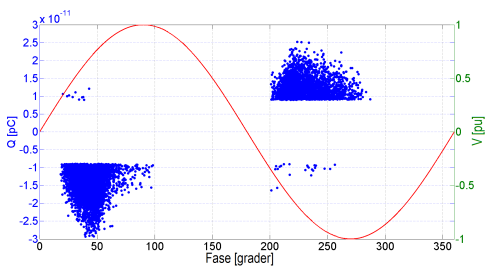
(b) Store utladninger (> 10,0 pC)

Figur C.146: PRPDA-plot av små og store utladninger, separert i Weibull-analyse. Målingene er fra Kabelskjøt B, ved 0,1 Hz.

Kabelskjøt C

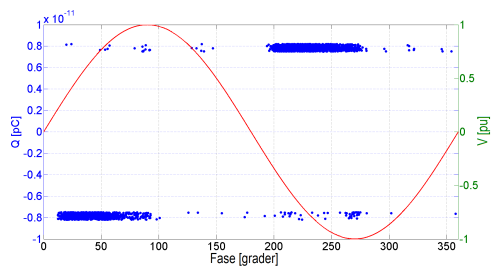


(a) Små utladninger (< 6,0 pC)

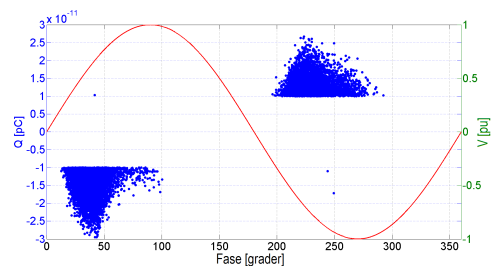


(b) Store utladninger (> 7,0 pC)

Figur C.147: PRPDA-plot av små og store utladninger, separert i Weibull-analyse. Målingene er fra Kabelskjøt C, ved 100 Hz.

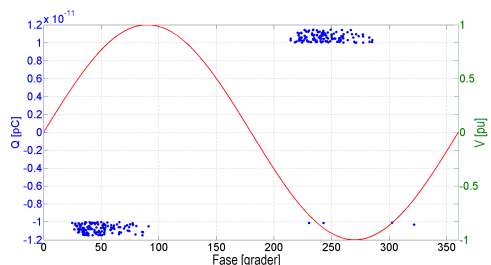


(a) Små utladninger (< 7,5 pC)

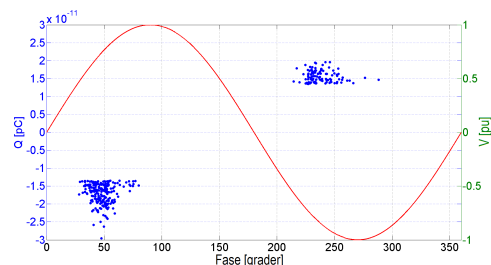


(b) Store utladninger (> 8,0 pC)

Figur C.148: PRPDA-plot av små og store utladninger, separert i Weibull-analyse. Målingene er fra Kabelskjøt C, ved 50,2 Hz.

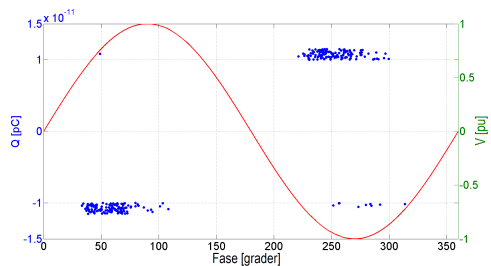


(a) Små utladninger (< 9,0 pC)

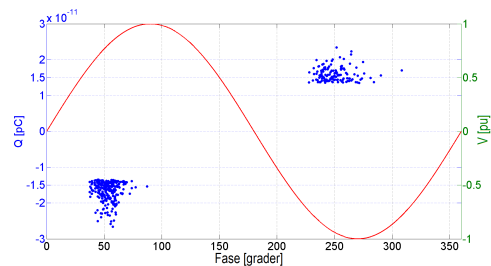


(b) Store utladninger (> 10,0 pC)

Figur C.149: PRPDA-plot av små og store utladninger, separert i Weibull-analyse. Målingene er fra Kabelskjøt C, ved 0,2 Hz.



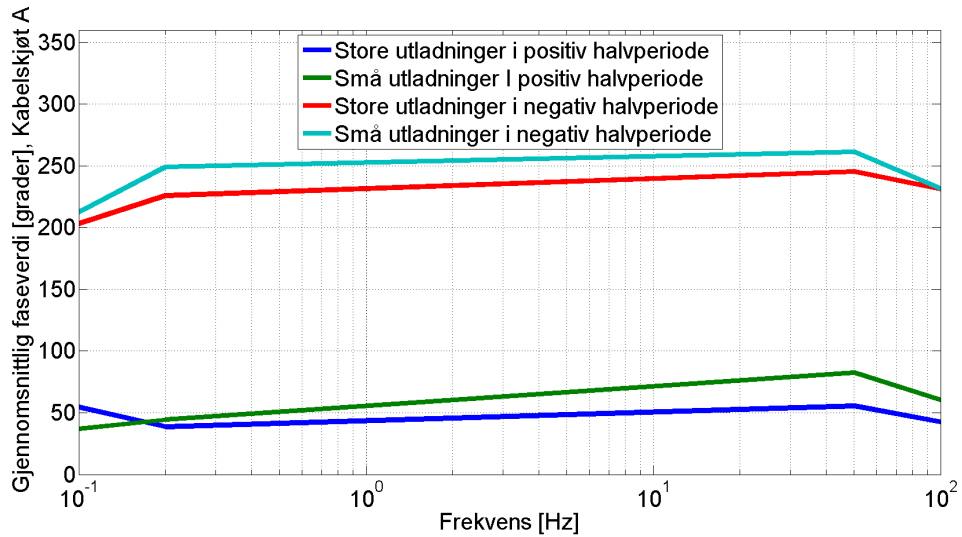
(a) Små utladninger (< 8,5 pC)



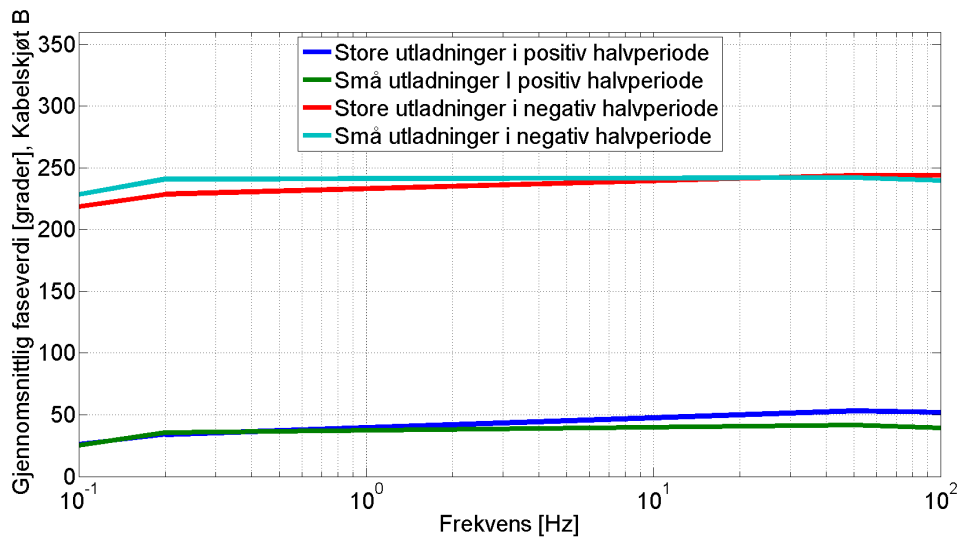
(b) Store utladninger (> 10,0 pC)

Figur C.150: PRPDA-plot av små og store utladninger, separert i Weibull-analyse. Målingene er fra Kabelskjøt C, ved 0,1 Hz.

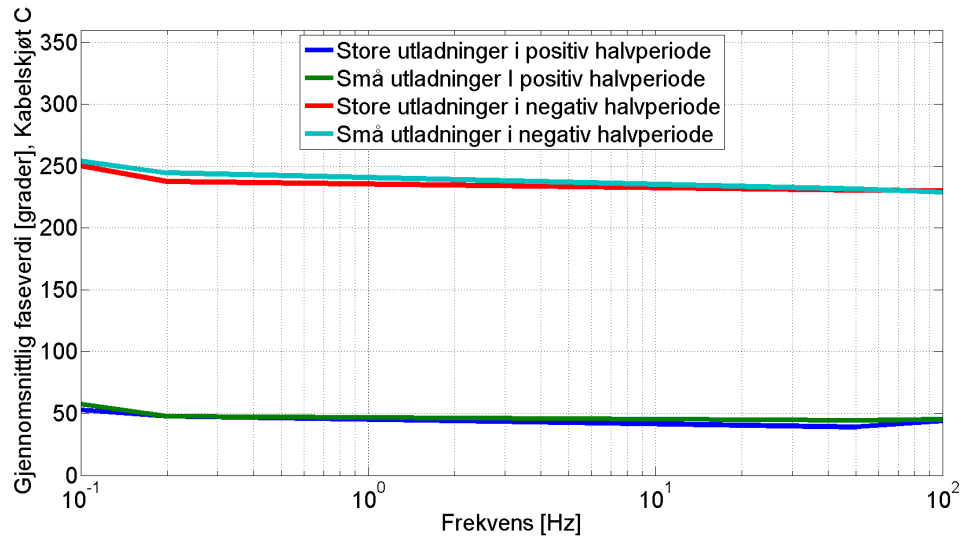
Gjennomsnittlig faseverdi



Figur C.151: Gjennomsnittlig faseverdi for store og små utladninger i Kabelskjøt A. Faseverdiene er plottet for positiv og negativ halvperiode.



Figur C.152: Gjennomsnittlig faseverdi for store og små utladninger i Kabelskjøt B. Faseverdiene er plottet for positiv og negativ halvperiode.

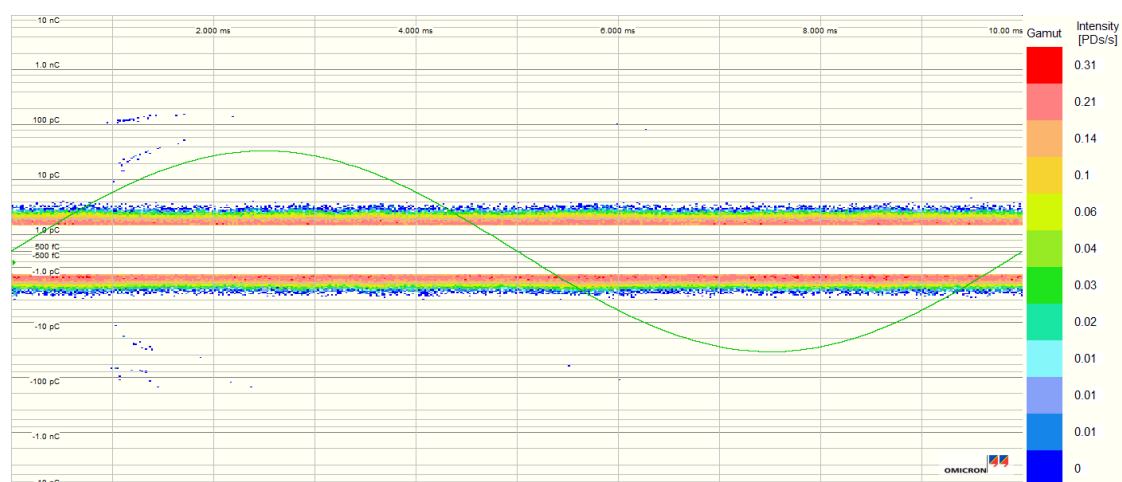


Figur C.153: Gjennomsnittlig faseverdi for store og små utladninger i Kabelskjøt C. Faseverdiene er plottet for positiv og negativ halvperiode.

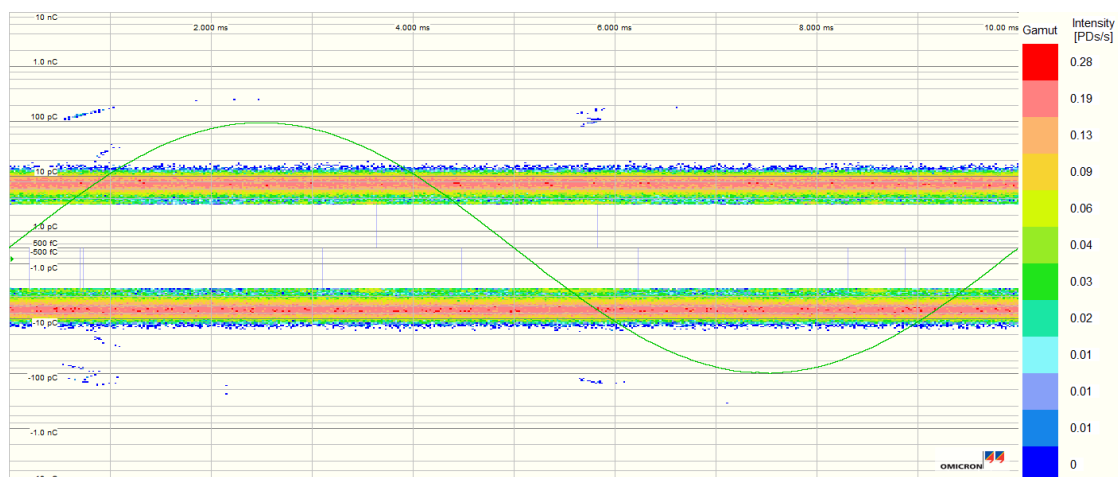
D Testing av termineringer

For å være sikker på at de målte utladningene ikke oppstår på grunn av dårlige termineringer, ble det utført tester på en referansekabel. Et stykke av kabelen til den ene fasen ble brukt til å gjøre målingene på. Det ble påtrykt 6, 9, 12 og 15 kV ved de ti frekvensene som PD-målingene ble utført på. Eneste unntaket var 0,1 Hz, hvor det kun ble påtrykt 6,9 og 12 kV, på grunn av begrenset spenning ut ifra spenningsgeneratoren.

D.1 100 Hz



Figur D.1: PD-måling gjort på termineringer i referansekabel, ved 12 kV og 100 Hz.



Figur D.2: PD-måling gjort på termineringer i referansekabel, ved 15 kV og 100 Hz.

D.2 50,2 Hz

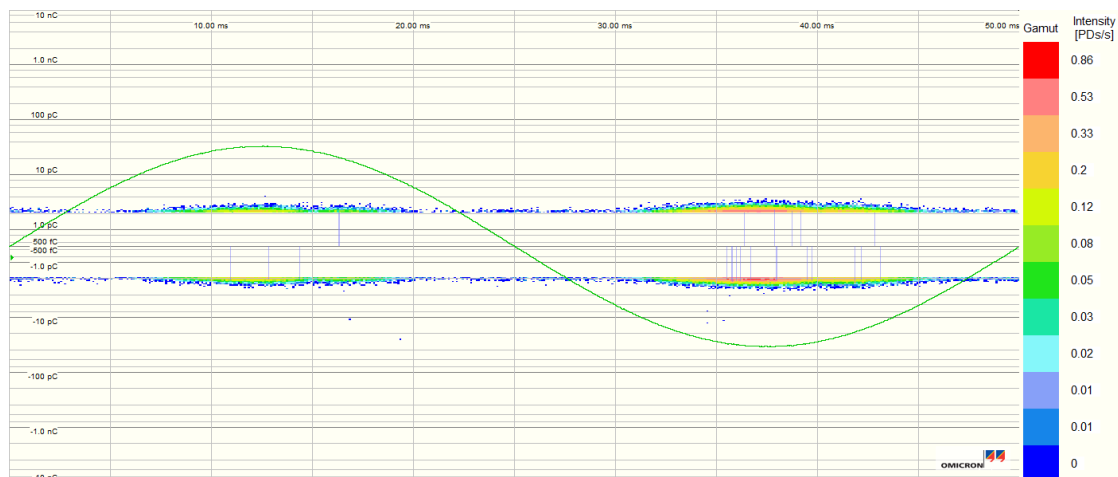


Figur D.3: PD-måling gjort på termineringer i referansekabel, ved 12 kV og 50,2 Hz.

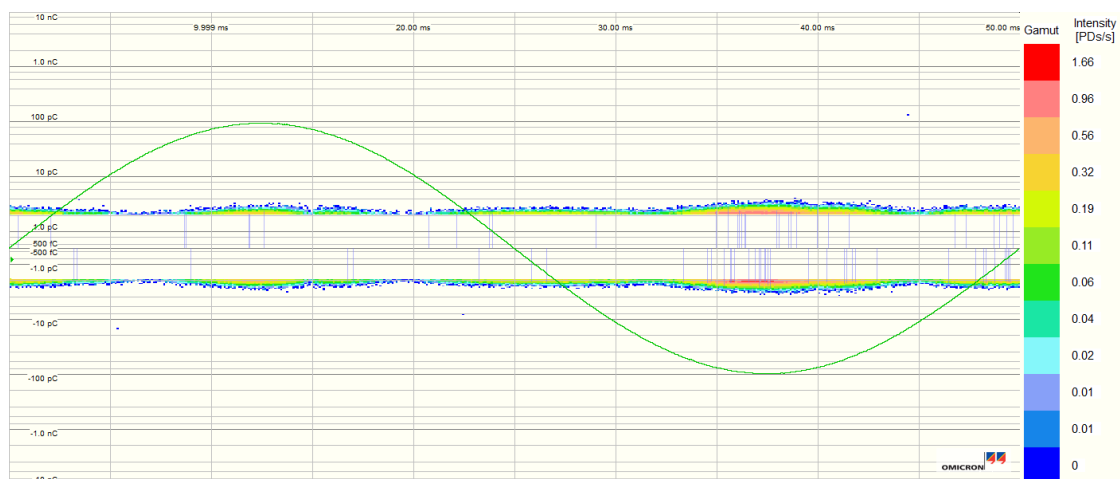


Figur D.4: PD-måling gjort på termineringer i referansekabel, ved 15 kV og 50,2 Hz.

D.3 20 Hz



Figur D.5: PD-måling gjort på termineringer i referansekabel, ved 12 kV og 20 Hz.

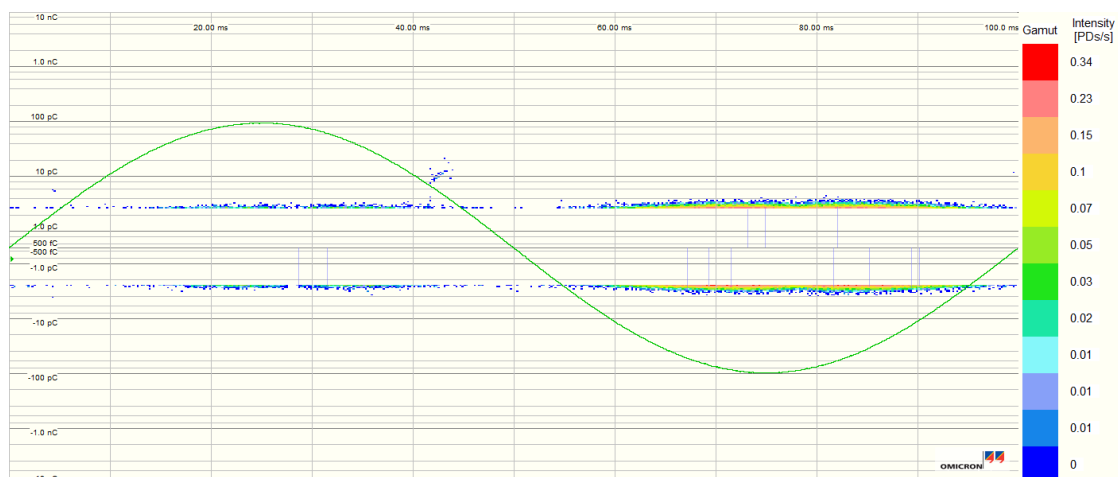


Figur D.6: PD-måling gjort på termineringer i referansekabel, ved 15 kV og 20 Hz.

D.4 10 Hz



Figur D.7: PD-måling gjort på termineringer i referansekabel, ved 12 kV og 10 Hz.



Figur D.8: PD-måling gjort på termineringer i referansekabel, ved 15 kV og 10 Hz.

D.5 5 Hz



Figur D.9: PD-måling gjort på termineringer i referansekabel, ved 12 kV og 5 Hz.



Figur D.10: PD-måling gjort på termineringer i referansekabel, ved 15 kV og 5 Hz.

D.6 2 Hz



Figur D.11: PD-måling gjort på termineringer i referansekabel, ved 12 kV og 2 Hz.



Figur D.12: PD-måling gjort på termineringer i referansekabel, ved 15 kV og 2 Hz.

D.7 1 Hz

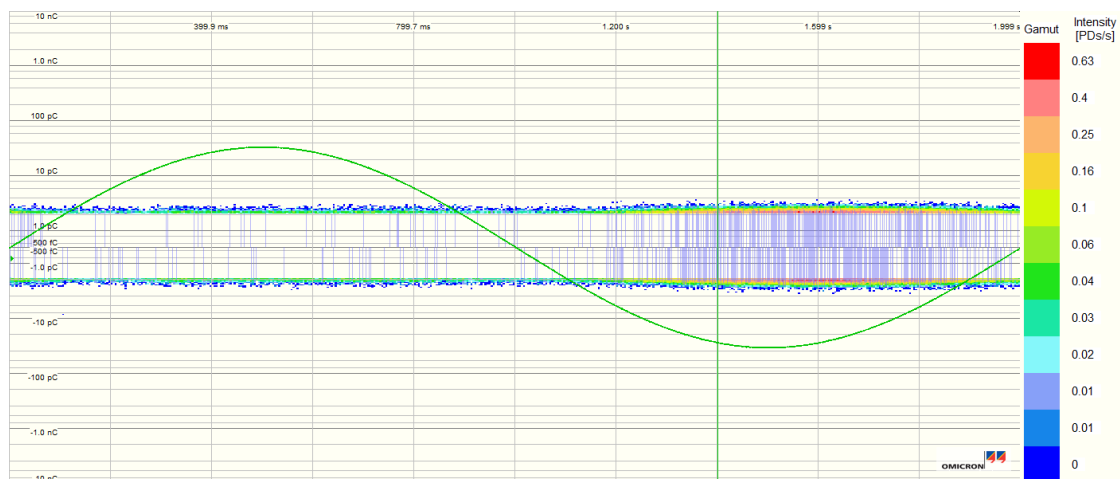


Figur D.13: PD-måling gjort på termineringer i referansekabel, ved 12 kV og 1 Hz.



Figur D.14: PD-måling gjort på termineringer i referansekabel, ved 15 kV og 1 Hz.

D.8 0,5 Hz



Figur D.15: PD-måling gjort på termineringer i referansekabel, ved 12 kV og 0,5 Hz.

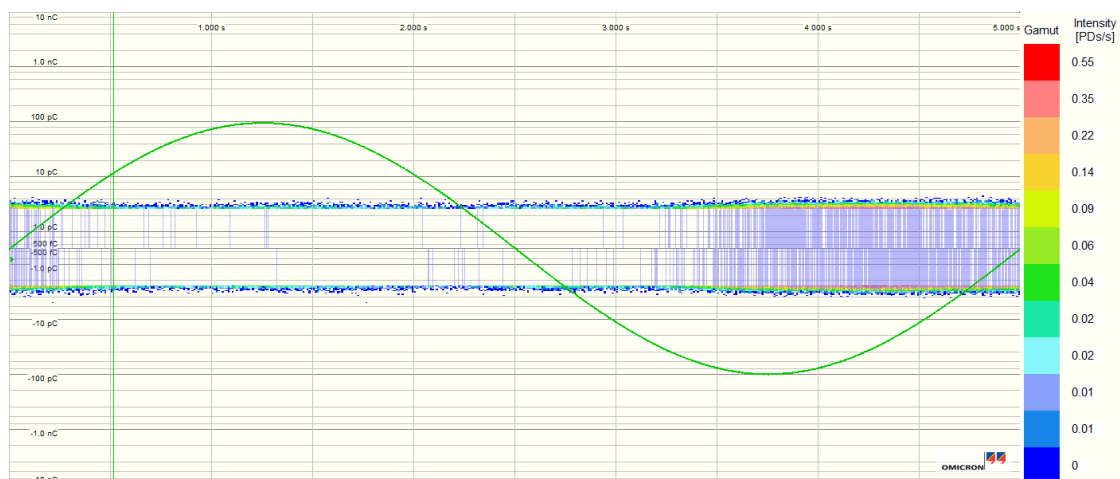


Figur D.16: PD-måling gjort på termineringer i referansekabel, ved 15 kV og 0,5 Hz.

D.9 0,2 Hz



Figur D.17: PD-måling gjort på termineringer i referansekabel, ved 12 kV og 0,2 Hz.

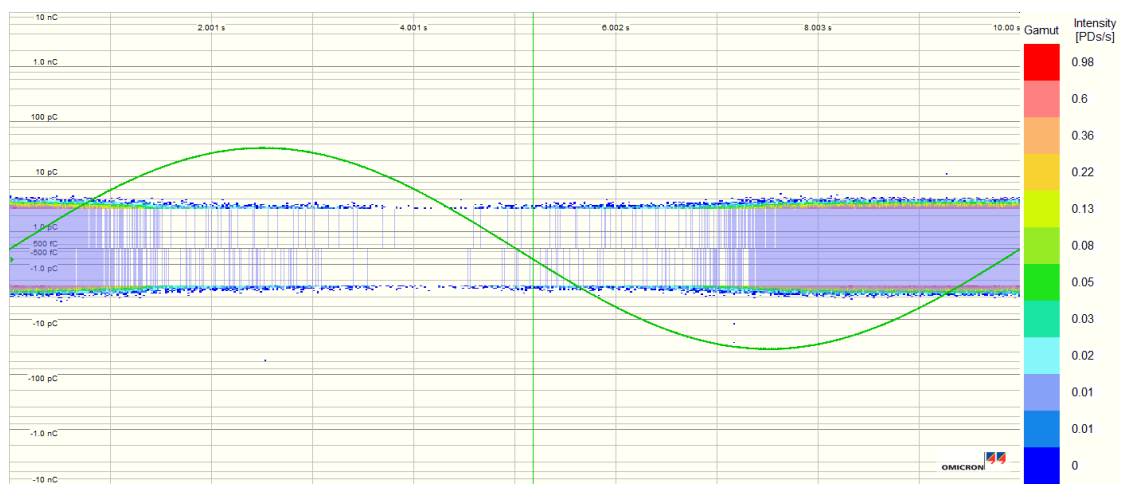


Figur D.18: PD-måling gjort på termineringer i referansekabel, ved 15 kV og 0,2 Hz.

D.10 0,1 Hz



Figur D.19: PD-måling gjort på termineringer i referansekabel, ved 9 kV og 0,1 Hz.



Figur D.20: PD-måling gjort på termineringer i referansekabel, ved 12 kV og 0,1 Hz.

E Koronamåling for å finne faseforskyvning

På grunn av de kapasitive egenskapene til målekretsen, vil det ved enkelte frekvenser kunne oppstå faseforskyvning under måling av PD. Måten dette har blitt justert på er å feste en kobbertråd i den åpne enden av testobjektet. Under PD-målingene henger det vanligvis en koronaring der, for å jevne ut det lokale elektriske feltet. Når det er festet en kobbertråd der i stedet, vil luften rundt ioniseres når den lokale feltstyrken er stor nok. Dette registreres som koronautladninger, som forventes å befinne seg rundt toppen av sinusspenningen.

Ved alle ti frekvensene økes spenningen til det observeres koronautladninger i negativ halvperiode. Måleverdiene eksporteres så til Matlab, hvor den gjennomsnittlige faseverdien til utladningene finnes. Dette gjøres ved å summere faseverdiene, og dele på antall utladninger. I noen tilfeller, spesielt ved de laveste frekvensene, oppstår det koronautladninger både i positiv og negativ halvperiode, som vist i Figur E.2. Det antas da at utladningene i positiv halvperiode er en forlengelse av de i negativ halvperiode. Dette løses ved å legge 360 grader til faseverdiene i positiv halvperiode, for så å summere alle faseverdiene, og dele på antall utladninger.

Tabell E.1: Gjennomsnittlig faseverdi for utladninger under koronamåling.

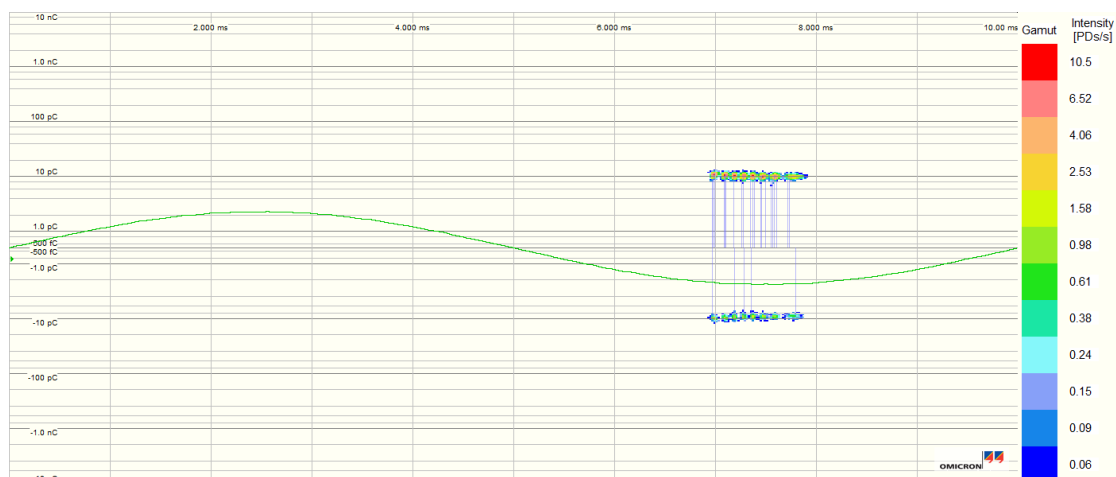
Frekvens [Hz]	Kabelskjøt A	Kabelskjøt B	Kabelskjøt C
0,1	328,2799	333,0375	296,7799
0,2	303,0750	305,9250	286,1326
0,5	277,1076	277,2175	265,0958
1	267,6494	271,4914	269,4377
2	267,8423	265,1269	263,7211
5	259,5478	262,1215	258,0208
10	262,5390	266,1226	260,9345
20	257,1638	261,9485	259,8214
50,2	259,6135	262,2920	260,3281
100	258,4396	263,5730	260,4094

Tabell E.2: Avvik fra 270 grader for gjennomsnittlig faseverdi i negativ halvperiode, gjort under koronamålinger. Alle verdiene i denne tabellen viser differansen mellom 270 og verdiene i Tabell E.1

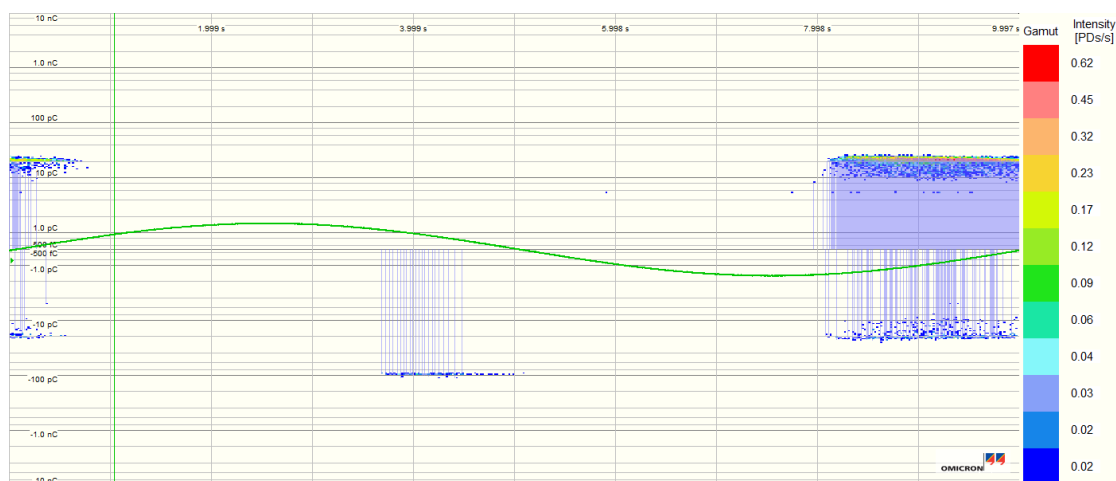
Frekvens [Hz]	Kabelskjøt A	Kabelskjøt B	Kabelskjøt C
0,1	-58,2799	-63,0375	-26,7799
0,2	-33,0750	-35,9250	-16,1326
0,5	-7,1076	-7,2175	4,9042
1	2,3506	-1,4914	0,5623
2	2,1577	4,8731	6,2789
5	10,4522	7,8785	11,9792
10	7,4610	3,8774	9,0655
20	12,8362	8,0515	10,1786
50,2	10,3865	7,7080	9,6719
100	11,5604	6,4270	9,5906

Tabell E.3: Avvik fra målingen gjort ved 100 Hz for gjennomsnittlige faseverdi, ved koronamålinger. Verdiene i tabellen viser forskjellen mellom gjennomsnittlig faseverdi ved 100 Hz og den aktuelle frekvensen, for alle tre testobjektene. Negativ differanse betyr at utladningene har blitt forskjøvet mot høyre, og må justeres tilsvarende grader mot venstre, for å kompenseres for.

Frekvens [Hz]	Kabelskjøt A	Kabelskjøt B	Kabelskjøt C
0,1	-69,8403	-69,4645	-36,3705
0,2	-44,6354	-42,3520	-25,7232
0,5	-18,6680	-13,6445	-4,6864
1	-9,2098	-7,9184	-9,0283
2	-9,4027	-1,5539	-3,3117
5	-1,1082	-1,4515	2,3886
10	-4,0994	-2,5496	-0,5251
20	1,2758	1,6245	0,5880
50,2	-1,1739	1,2810	0,0813
100	0	0	0



Figur E.1: Koronautladninger i Kabelskjøt B, ved 100 Hz. Utladningene ligger i området rundt den toppverdien, i den negative halvperiode. Den gjennomsnittlige faseverdien til utladningene er 263,5730 grader ifølge Tabell E.1.



Figur E.2: Koronautladninger i Kabelskjøt B, ved 0,1 Hz. Utladningene ligger forskjøtvet mot høyre, i forhold til den negative toppverdien. Noen av utladningene befinner seg i den positive halvperioden. Måten dette løses på i forhold til gjennomsnittlig faseverdi, er at det legges til 360 grader på faseverdien til utladningene i positiv halvperiode. Utladningene mellom 90 og 180 grader blir ikke tatt med i gjennomsnittsberegningen.

F Dielektrisk responsmåling

F.1 Tapsfaktor, $\tan(\delta)$

Tabell F.1: Forholdet mellom $\tan(\delta)$ ved 0,1 og 50 Hz.

Frekvens [Hz]	Kabelskjøt A	Kabelskjøt B	Kabelskjøt C
1 kV	3,8	3,5	5,3
3 kV	4,2	3,9	5,3
6 kV	4,6	4,3	5,5
9 kV	4,8	4,7	5,4
12 kV	5,2	6,7	5,6

Tabell F.2: Tapsfaktor målt ved 12 kV påtrykt spenning. Målingene er gjort to ganger, ved hver frekvens.

Frekvens [Hz]	Kabelskjøt A	Kabelskjøt B	Kabelskjøt C
100 Hz	0,0020112	0,0022393	0,0014144
100 Hz	0,0020189	0,0022433	0,0014172
50,2 Hz	0,00189671	0,0019785	0,0013553
50,2 Hz	0,0019012	0,0019823	0,0013567
20 Hz	0,0017496	0,0017431	0,0012511
20 Hz	0,0017539	0,0017448	0,0012546
10 Hz	0,0017507	0,0017107	0,0012335
10 Hz	0,0017550	0,0017168	0,0012360
5 Hz	0,0018512	0,0018082	0,0012741
5 Hz	0,0018573	0,0018110	0,0012748
2 Hz	0,0022159	0,0021615	0,0014930
2 Hz	0,0022209	0,0021700	0,0014944
1 Hz	0,0028142	0,0027287	0,0018704
1 Hz	0,0028503	0,0027437	0,0018810
0,5 Hz	0,0038907	0,0037890	0,0026028
0,5 Hz	0,0038862	0,0038109	0,0026240
0,2 Hz	0,0063225	0,0065199	0,0045662
0,2 Hz	0,0063359	0,0065502	0,0045685
0,1 Hz	0,0098253	0,0105430	0,0075998
0,1 Hz	0,0098356	0,0105860	0,0076038

Tabell F.3: Tapsfaktor målt ved 9 kV påtrykt spenning. Målingene er gjort to ganger, ved hver frekvens.

Frekvens [Hz]	Kabelskjøt A	Kabelskjøt B	Kabelskjøt C
100 Hz	0,0019722	0,0022012	0,0013788
100 Hz	0,0019789	0,0022048	0,0013819
50,2 Hz	0,0017838	0,0018941	0,0012792
50,2 Hz	0,0017866	0,0018981	0,0012798
20 Hz	0,0016251	0,0016150	0,0011743
20 Hz	0,0016279	0,0016168	0,0011743
10 Hz	0,0016098	0,0015395	0,0011452
10 Hz	0,0016080	0,0015432	0,0011446
5 Hz	0,0016679	0,0015802	0,0011601
5 Hz	0,0016671	0,0015780	0,0011568
2 Hz	0,0019170	0,0018287	0,0013174
2 Hz	0,0019202	0,0018352	0,0013191
1 Hz	0,0023955	0,0022692	0,0016445
1 Hz	0,0023982	0,0022494	0,0016440
0,5 Hz	0,0032646	0,0030725	0,0022648
0,5 Hz	0,0032436	0,0030874	0,0022624
0,2 Hz	0,0053776	0,0053595	0,0040494
0,2 Hz	0,0054150	0,0053583	0,0040606
0,1 Hz	0,0085165	0,0089082	0,0068694
0,1 Hz	0,0085995	0,0089320	0,0068914

Tabell F.4: Tapsfaktor målt ved 6 kV påtrykt spenning. Målingene er gjort to ganger, ved hver frekvens.

Frekvens [Hz]	Kabelskjøt A	Kabelskjøt B	Kabelskjøt C
100 Hz	0,0019608	0,0021824	0,0013489
100 Hz	0,0019618	0,0021840	0,0013499
50,2 Hz	0,0016487	0,0018085	0,0011586
50,2 Hz	0,0016553	0,0018106	0,0011563
20 Hz	0,0015005	0,0014940	0,0010225
20 Hz	0,0015040	0,0014957	0,0010253
10 Hz	0,0015073	0,0013942	0,0010091
10 Hz	0,0015050	0,0013923	0,0010131
5 Hz	0,0015183	0,0013841	0,0010531
5 Hz	0,0015192	0,0013846	0,0010527
2 Hz	0,0017018	0,0015806	0,0012290
2 Hz	0,0016985	0,0015782	0,0012319
1 Hz	0,0020823	0,0019509	0,0015067
1 Hz	0,0020857	0,0019534	0,0015175
0,5 Hz	0,0027615	0,0026084	0,0020536
0,5 Hz	0,0027682	0,0026171	0,0020568
0,2 Hz	0,0046405	0,0045482	0,0036615
0,2 Hz	0,0046575	0,0045523	0,0036793
0,1 Hz	0,0075016	0,0077599	0,0063301
0,1 Hz	0,0075443	0,0077805	0,0063795

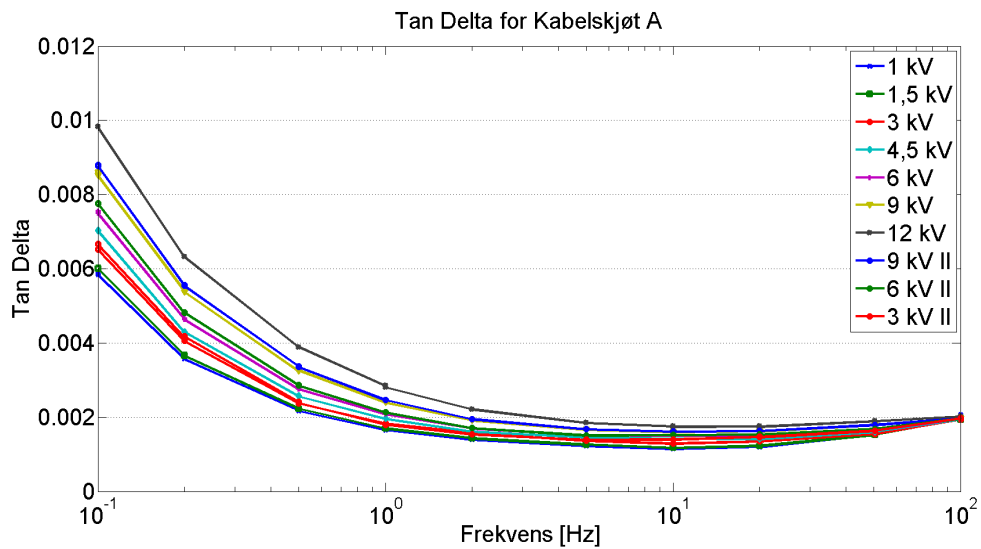
Tabell F.5: Tapsfaktor målt ved 3 kV påtrykt spenning. Målingene er gjort to ganger, ved hver frekvens.

Frekvens [Hz]	Kabelskjøt A	Kabelskjøt B	Kabelskjøt C
100 Hz	0,0019367	0,0022145	0,00133630
100 Hz	0,0019362	0,0022212	0,00133740
50,2 Hz	0,0015469	0,0017560	0,00110300
50,2 Hz	0,0015522	0,0017561	0,00110620
20 Hz	0,0013527	0,0014034	0,00093486
20 Hz	0,0013494	0,0014054	0,00093156
10 Hz	0,0012977	0,0012607	0,00087983
10 Hz	0,0012927	0,0012626	0,00087976
5 Hz	0,0013635	0,0012183	0,00088991
5 Hz	0,0013663	0,0012214	0,00089099
2 Hz	0,0015812	0,0013717	0,00102020
2 Hz	0,0015838	0,0013704	0,00101340
1 Hz	0,0018269	0,0016795	0,00127710
1 Hz	0,0018344	0,0016769	0,00127740
0,5 Hz	0,0023707	0,0022827	0,00180940
0,5 Hz	0,0023853	0,0022808	0,00180800
0,2 Hz	0,0040588	0,0040503	0,00338050
0,2 Hz	0,0040677	0,0040610	0,00339330
0,1 Hz	0,0065149	0,0068916	0,00587700
0,1 Hz	0,0065296	0,0068702	0,00587900

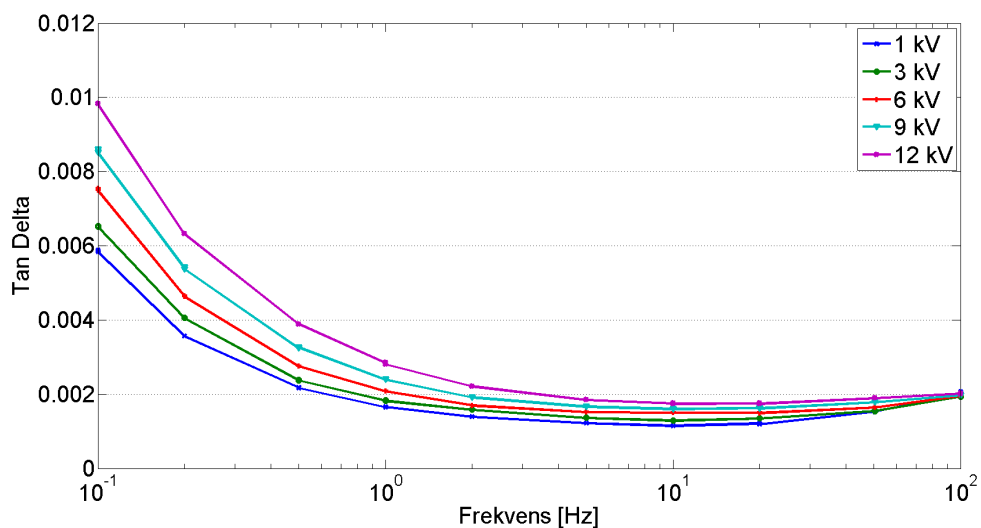
Tabell F.6: Tapsfaktor målt ved 1 kV påtrykt spenning. Målingene er gjort to ganger, ved hver frekvens.

Frekvens [Hz]	Kabelskjøt A	Kabelskjøt B	Kabelskjøt C
100 Hz	0,0020673	0,0023907	0,00128950
100 Hz	0,0020493	0,0023886	0,00129850
50,2 Hz	0,0015331	0,0018220	0,00104950
50,2 Hz	0,0015308	0,0018263	0,00105380
20 Hz	0,0011930	0,0013881	0,00087804
20 Hz	0,0012175	0,0013893	0,00087916
10 Hz	0,0011508	0,0012055	0,00082102
10 Hz	0,0011442	0,0012018	0,00081996
5 Hz	0,0012219	0,0011444	0,00082456
5 Hz	0,0012211	0,0011425	0,00082129
2 Hz	0,0013979	0,0012235	0,00093133
2 Hz	0,0013952	0,0012212	0,00092940
1 Hz	0,0016615	0,0014772	0,00115950
1 Hz	0,0016574	0,0014716	0,00115650
0,5 Hz	0,0021728	0,0020654	0,00166440
0,5 Hz	0,0021826	0,0020514	0,00167440
0,2 Hz	0,0035691	0,0037235	0,00311020
0,2 Hz	0,0035723	0,0037239	0,00312050
0,1 Hz	0,0058456	0,0064275	0,00553980
0,1 Hz	0,0058768	0,0064524	0,00551230

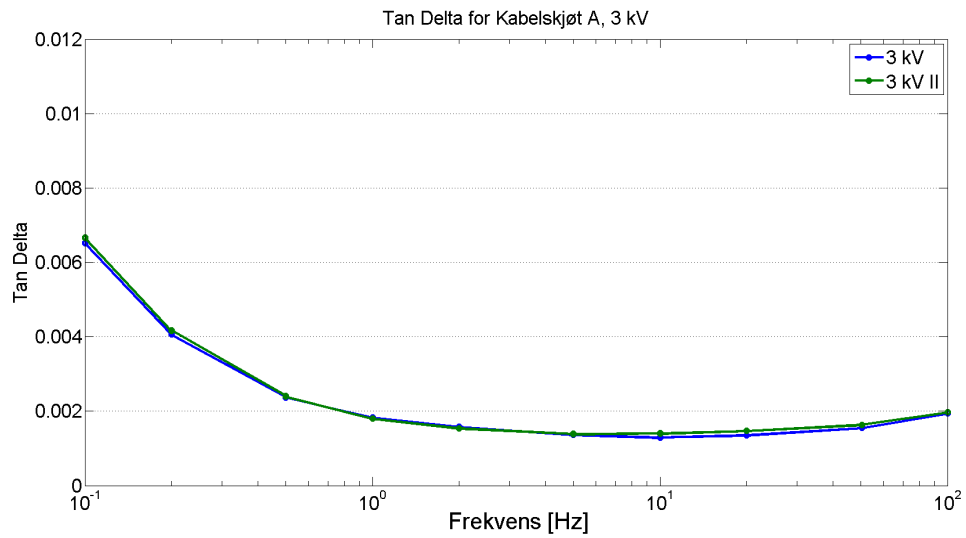
F.1.1 Kabelskjøt A



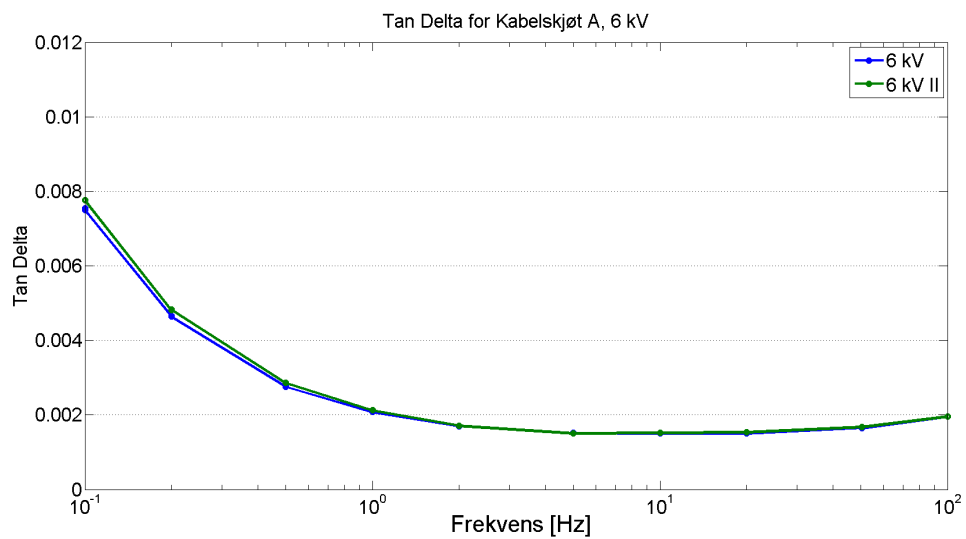
Figur F.1: Dielektrisk responsmåling for Kabelskjøt A. Tapsfaktoren vises for alle målte spenningsverdier i følgende rekkefølge: 1-1,5-3-4,5-6-9-12-9-6-3 kV. Tapsfaktoren øker ved å øke spenningen. Høy tpsfaktor ved lave frekvenser skyldes dominerende resistiv strøm ved redusering av frekvensen.



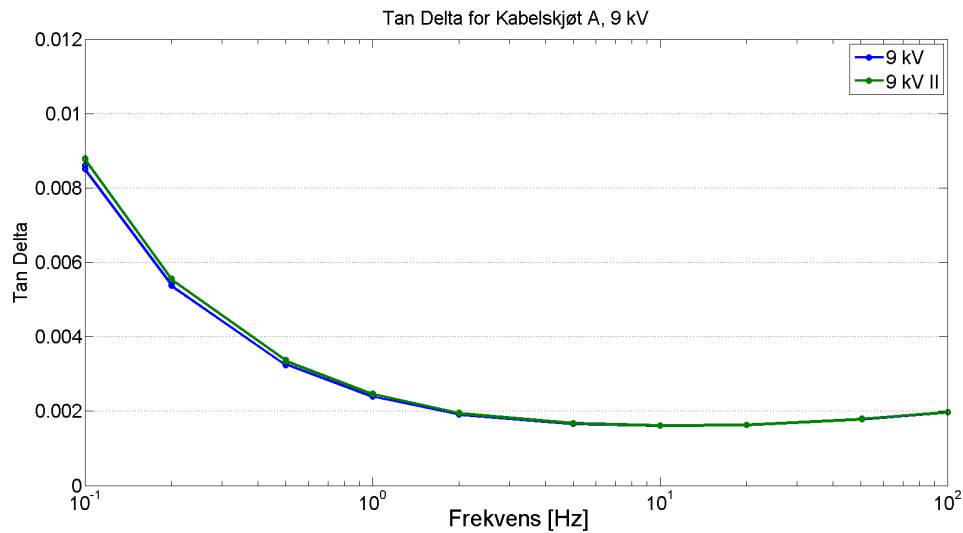
Figur F.2: Dielektrisk responsmåling for Kabelskjøt A. Tapsfaktoren vises for 1-3-6-9-12 kV. Tapsfaktoren øker ved å øke spenningen. Høy tpsfaktor ved lave frekvenser skyldes dominerende resistiv strøm ved redusering av frekvensen.



Figur F.3: Dielektrisk responsmåling for Kabelskjøt A. Viser måling gjort ved 3 kV, både før og etter at høyeste spenning har blitt påtrykt (12 kV). Målingene er nesten identiske.

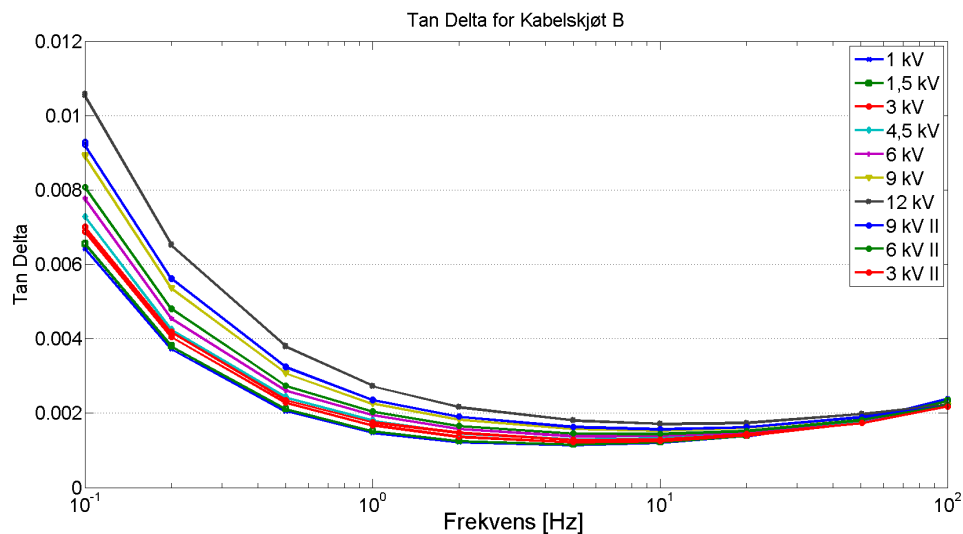


Figur F.4: Dielektrisk responsmåling for Kabelskjøt A. Viser måling gjort ved 6 kV, både før og etter at høyeste spenning har blitt påtrykt (12 kV). Målingene er nesten identiske.

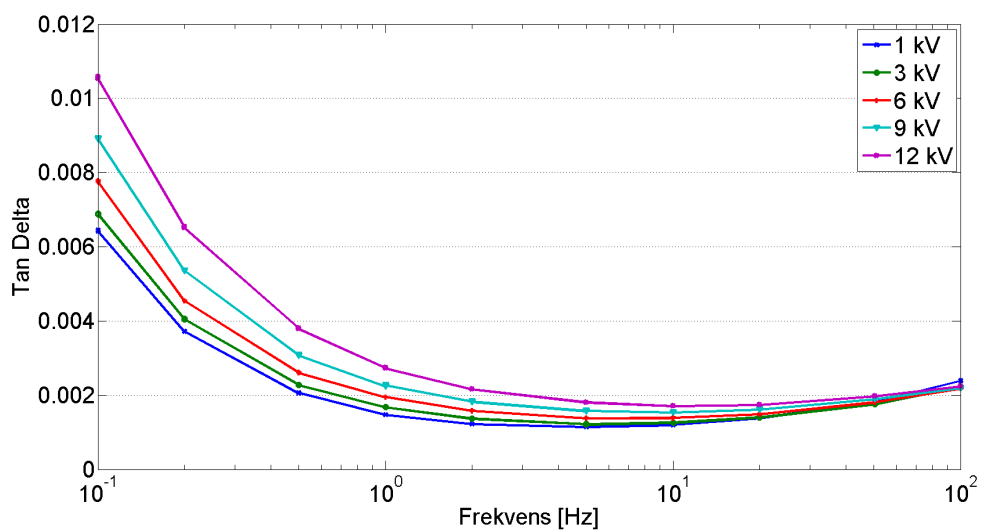


Figur F.5: Dielektrisk responsmåling for Kabelskjøt A. Viser måling gjort ved 9 kV, både før og etter at høyeste spenning har blitt påtrykt (12 kV). Målingene er nesten identiske.

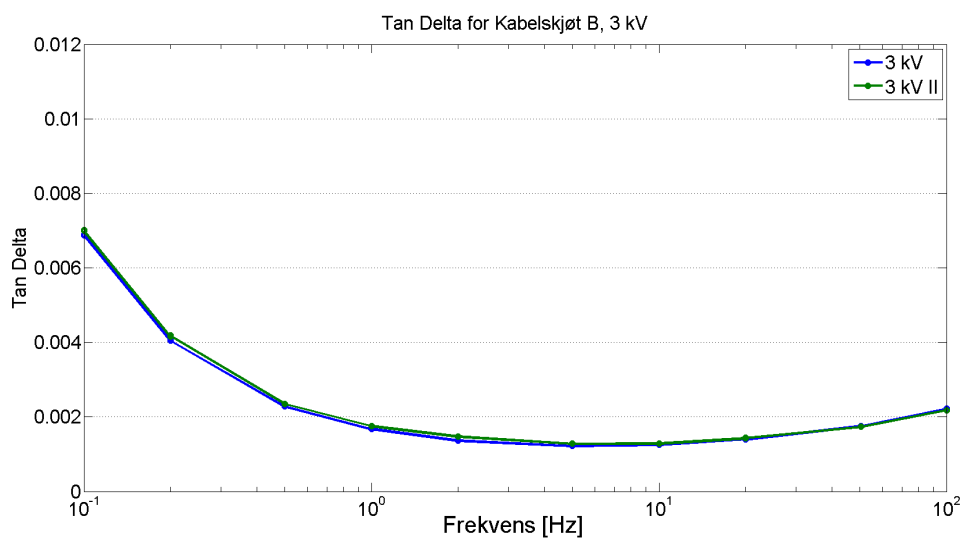
F.1.2 Kabelskjøt B



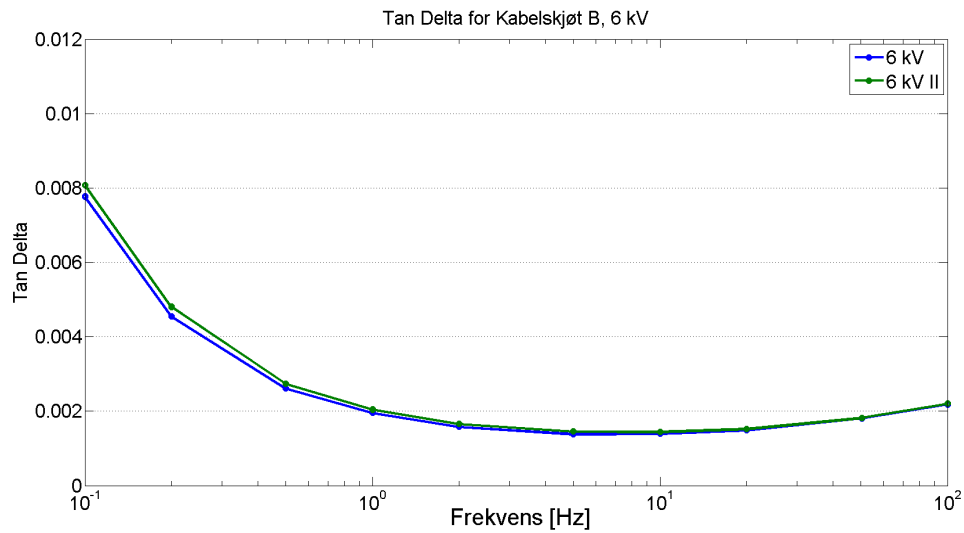
Figur F.6: Dielektrisk responsmåling for Kabelskjøt B. Tapsfaktoren vises for alle målte spenningsverdier i følgende rekkefølge: 1-1,5-3-4,5-6-9-12-9-6-3 kV. Tapsfaktoren øker ved å øke spenningen. Høy tpsfaktor ved lave frekvenser skyldes dominerende resistiv strøm ved redusering av frekvensen.



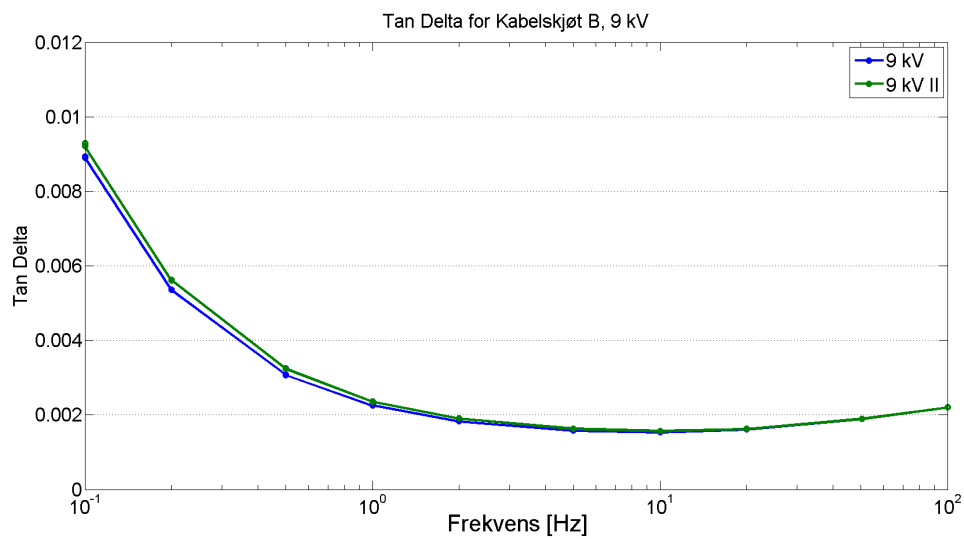
Figur F.7: Dielektrisk responsmåling for Kabelskjøt B. Tapsfaktoren vises for 1-3-6-9-12 kV. Tapsfaktoren øker ved å øke spenningen. Høy tapsfaktor ved lave frekvenser skyldes dominerende resistiv strøm ved redusering av frekvensen.



Figur F.8: Dielektrisk responsmåling for Kabelskjøt B. Viser måling gjort ved 3 kV, både før og etter at høyeste spenning har blitt påtrykt (12 kV). Målingene er nesten identiske.

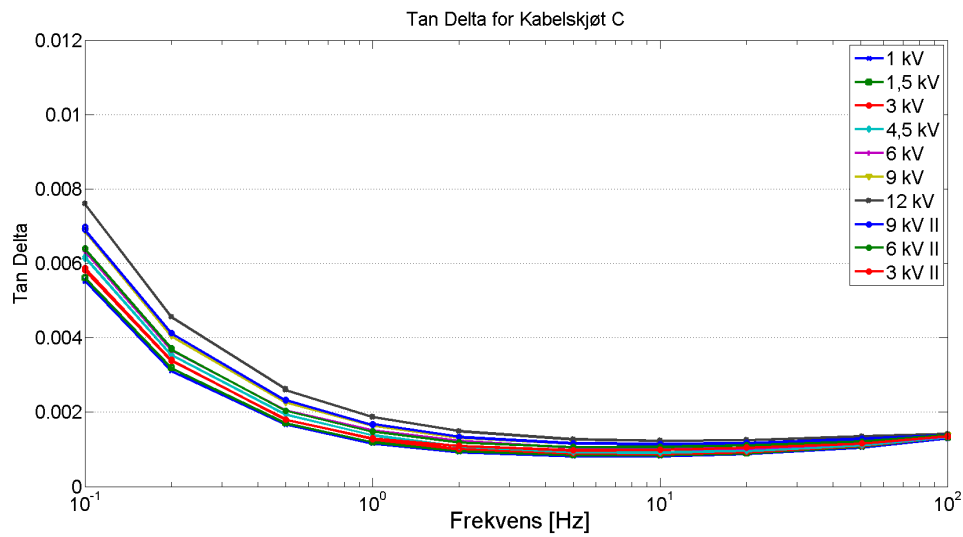


Figur F.9: Dielektrisk responsmåling for Kabelskjøt B. Viser måling gjort ved 6 kV, både før og etter at høyeste spenning har blitt påtrykt (12 kV). Målingene er nesten identiske.

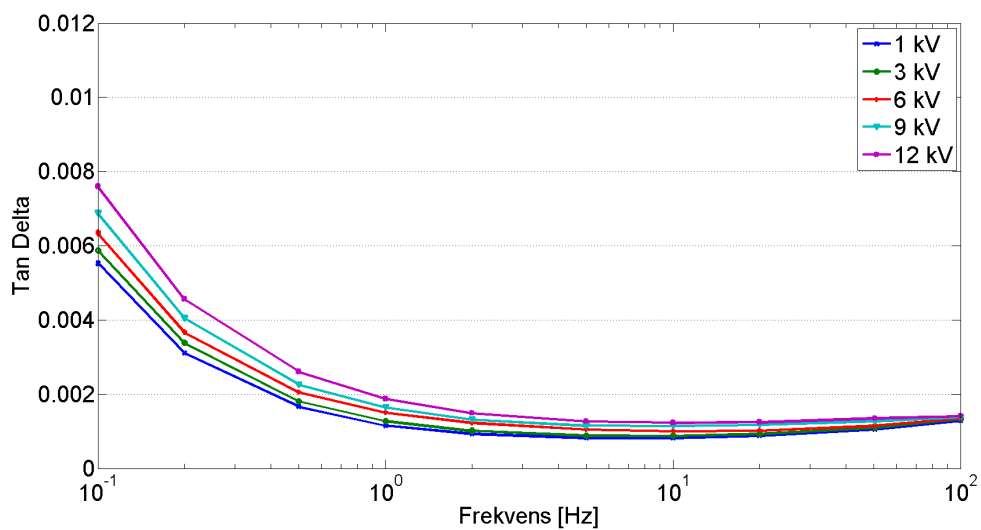


Figur F.10: Dielektrisk responsmåling for Kabelskjøt B. Viser måling gjort ved 9 kV, både før og etter at høyeste spenning har blitt påtrykt (12 kV). Målingene er nesten identiske.

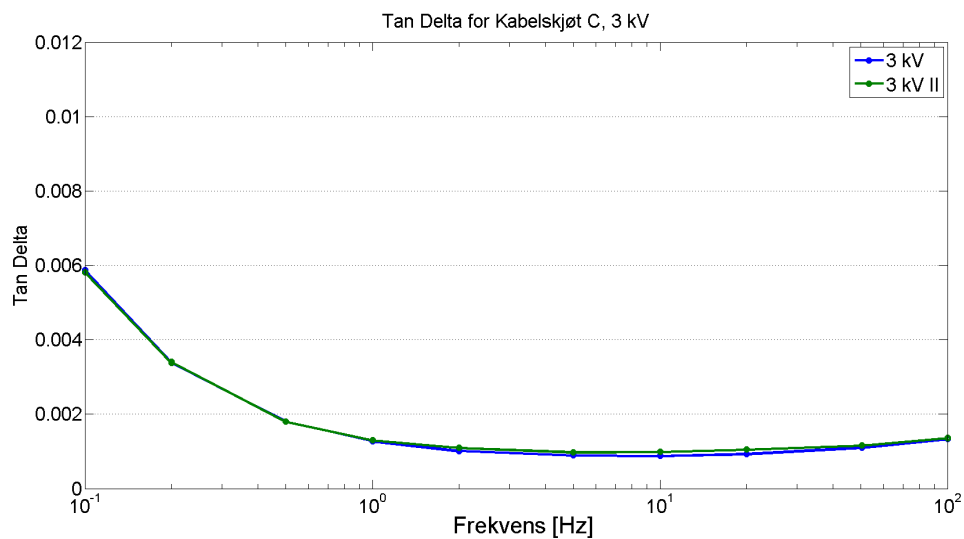
F.1.3 Kabelskjøt C



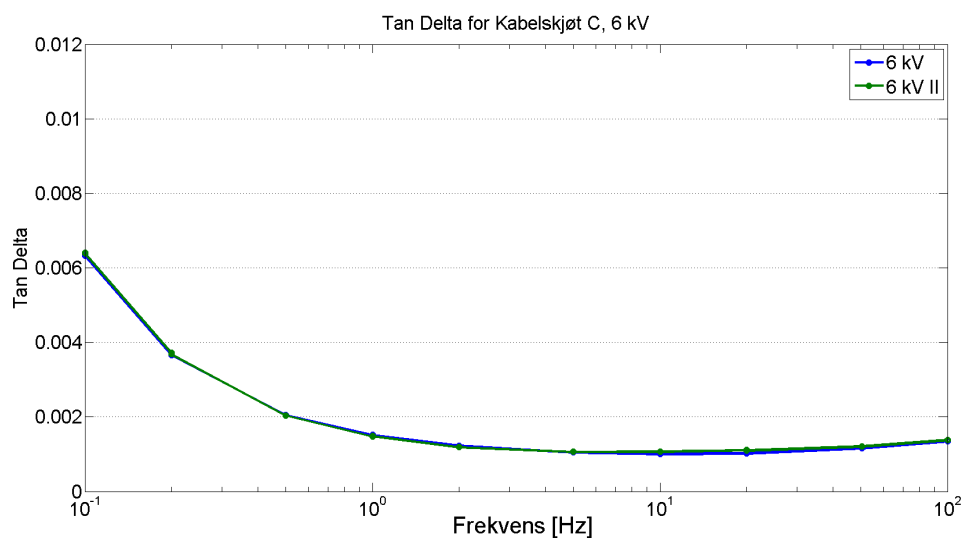
Figur F.11: Dielektrisk responsmåling for Kabelskjøt C. Tapsfaktoren vises for alle målte spenningsverdier i følgende rekkefølge: 1-1,5-3-4,5-6-9-12-9-6-3 kV. Tapsfaktoren øker ved å øke spenningen. Høy tpsfaktor ved lave frekvenser skyldes dominerende resistiv strøm ved redusering av frekvensen.



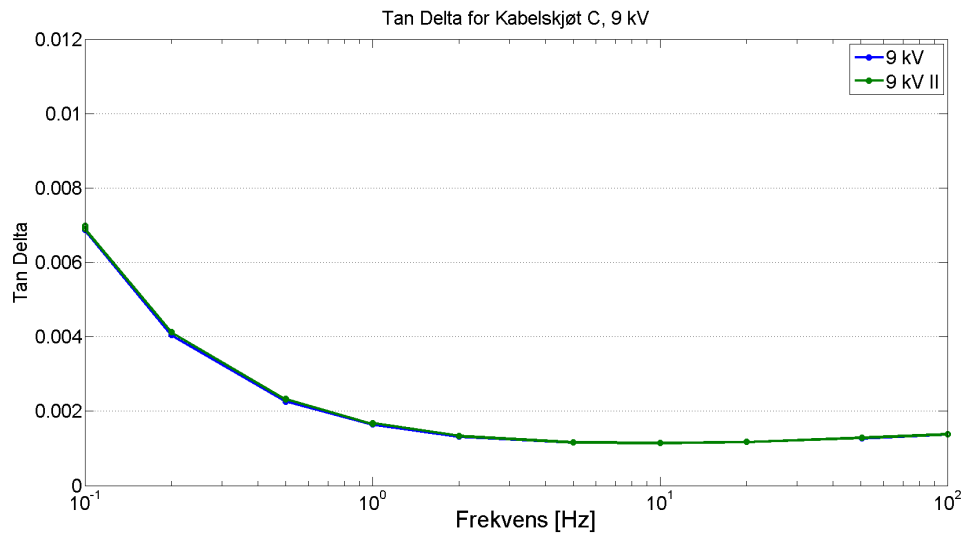
Figur F.12: Dielektrisk responsmåling for Kabelskjøt C. Tapsfaktoren vises for 1-3-6-9-12 kV. Tapsfaktoren øker ved å øke spenningen. Høy tpsfaktor ved lave frekvenser skyldes dominerende resistiv strøm ved redusering av frekvensen.



Figur F.13: Dielektrisk responsmåling for Kabelskjøt C. Viser måling gjort ved 3 kV, både før og etter at høyeste spenning har blitt påtrykt (12 kV). Målingene er nesten identiske.

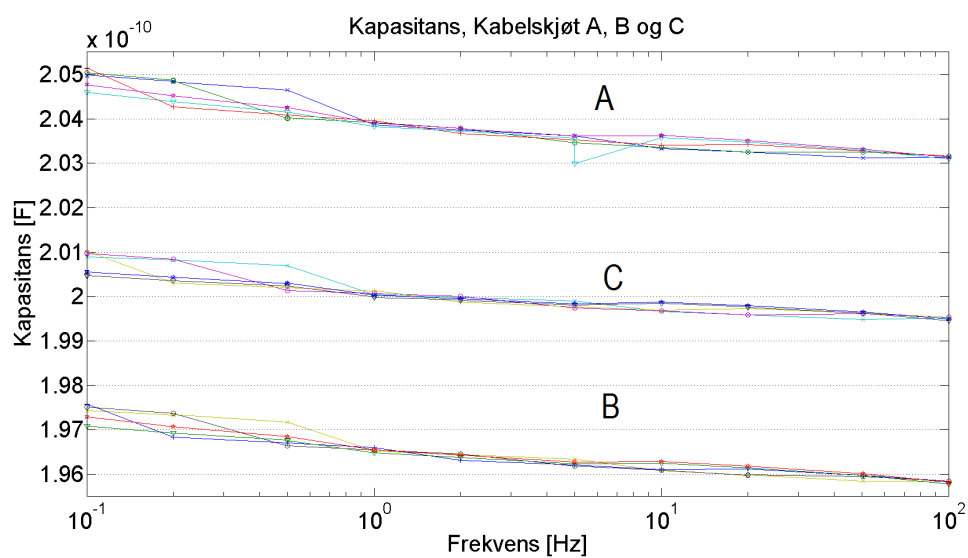


Figur F.14: Dielektrisk responsmåling for Kabelskjøt C. Viser måling gjort ved 6 kV, både før og etter at høyeste spenning har blitt påtrykt (12 kV). Målingene er nesten identiske.



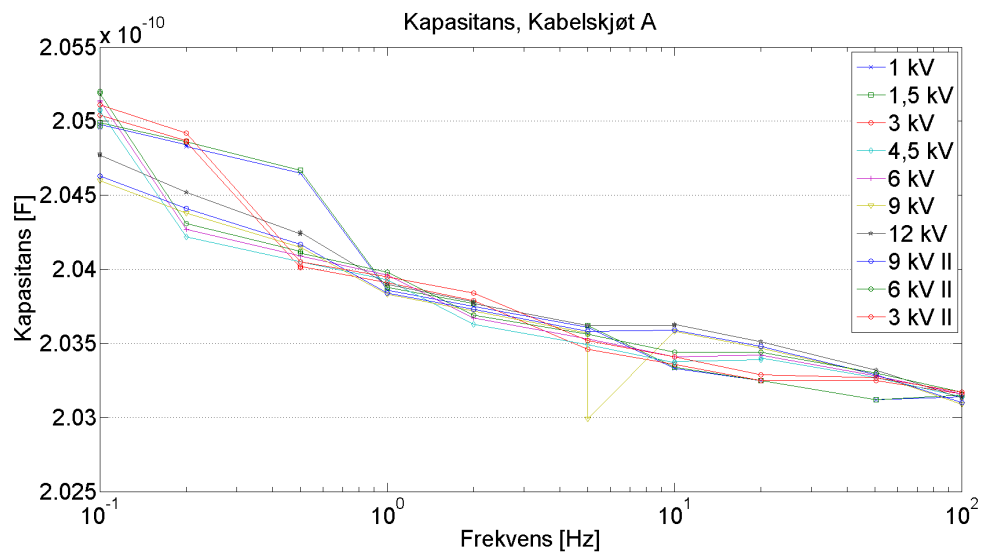
Figur F.15: Dielektrisk responsmåling for Kabelskjøt C. Viser måling gjort ved 9 kV, både før og etter at høyeste spenning har blitt påtrykt (12 kV). Målingene er nesten identiske.

F.2 Kapasitans

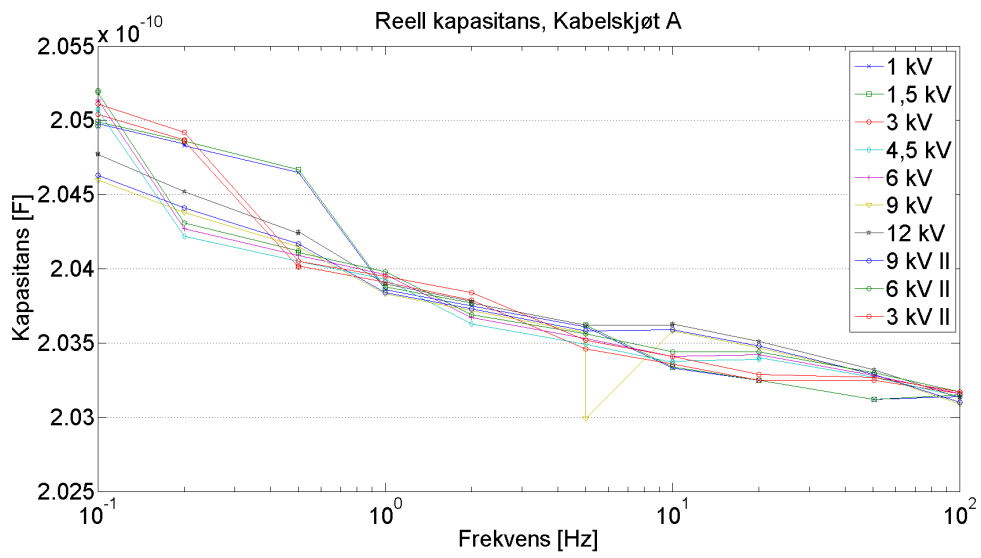


Figur F.16: Kapasitans, Kabelskjøt A, B og C

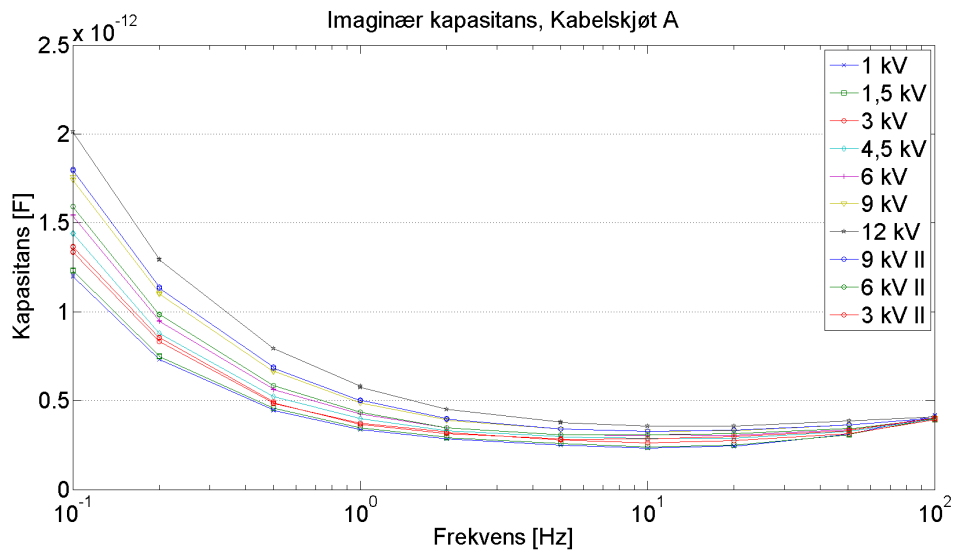
F.2.1 Kabelskjøt A



Figur F.17: Kapasitans, Kabelskjøt A

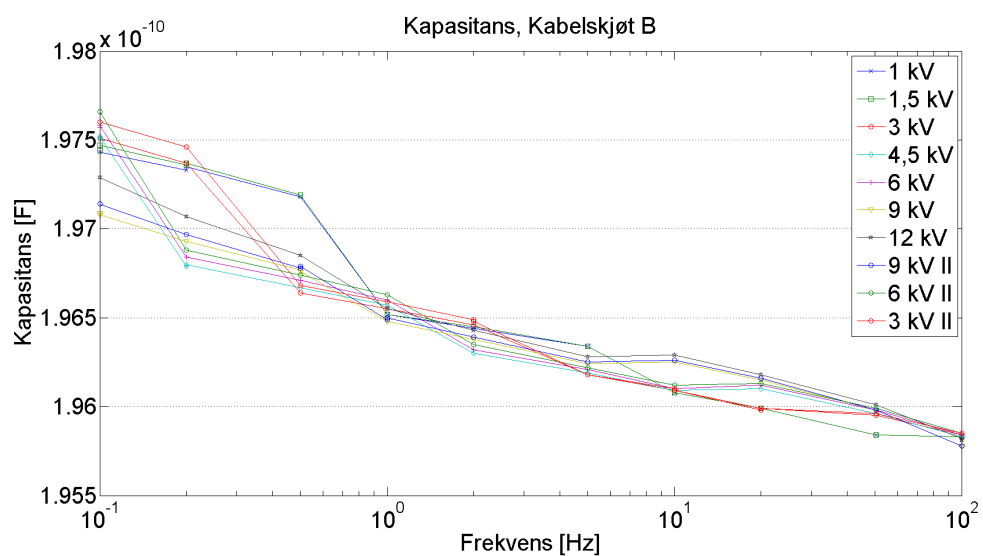


Figur F.18: Realdelen av kapasitansen i Kabelskjøt A

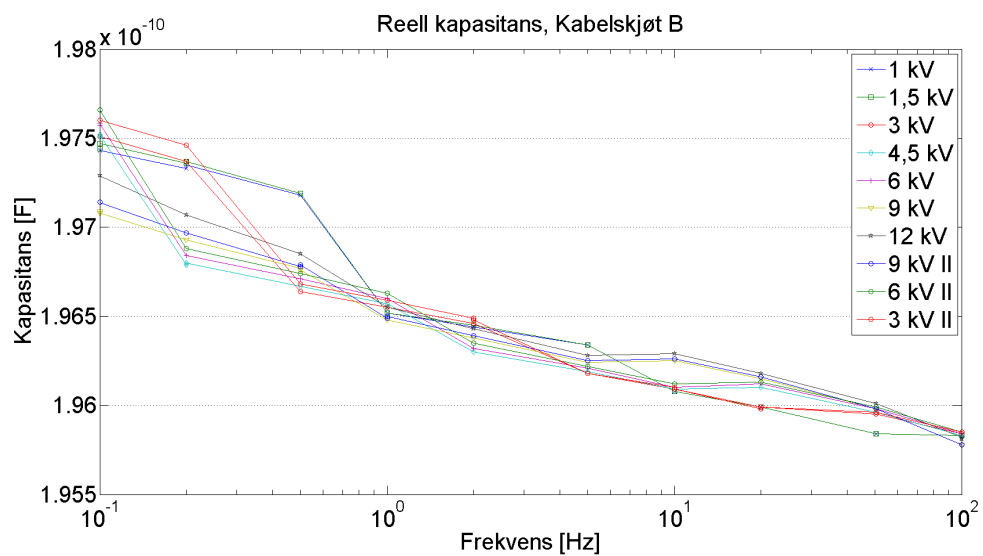


Figur F.19: Imaginærdelen av kapasitansen i Kabelskjøt A

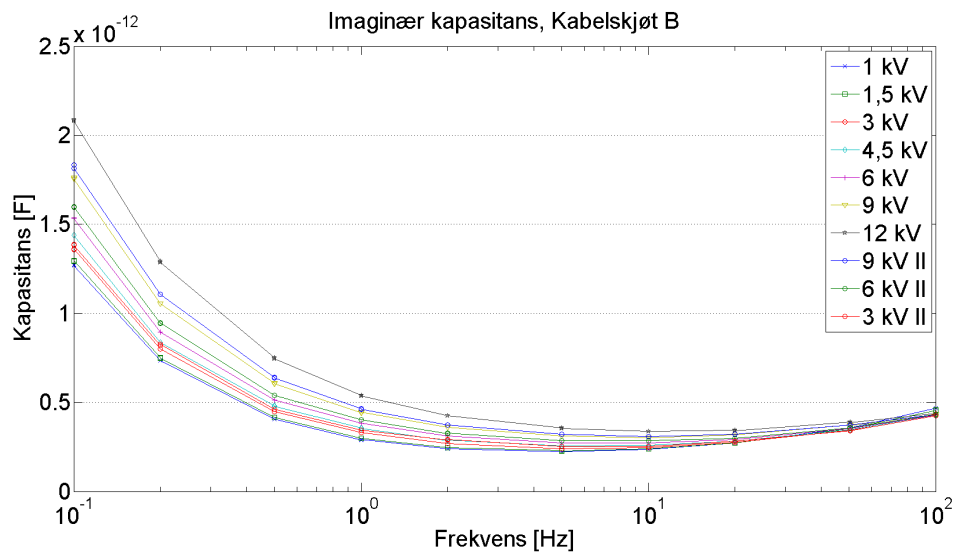
F.2.2 Kabelskjøt B



Figur F.20: Kapacitans, Kabelskjøt B

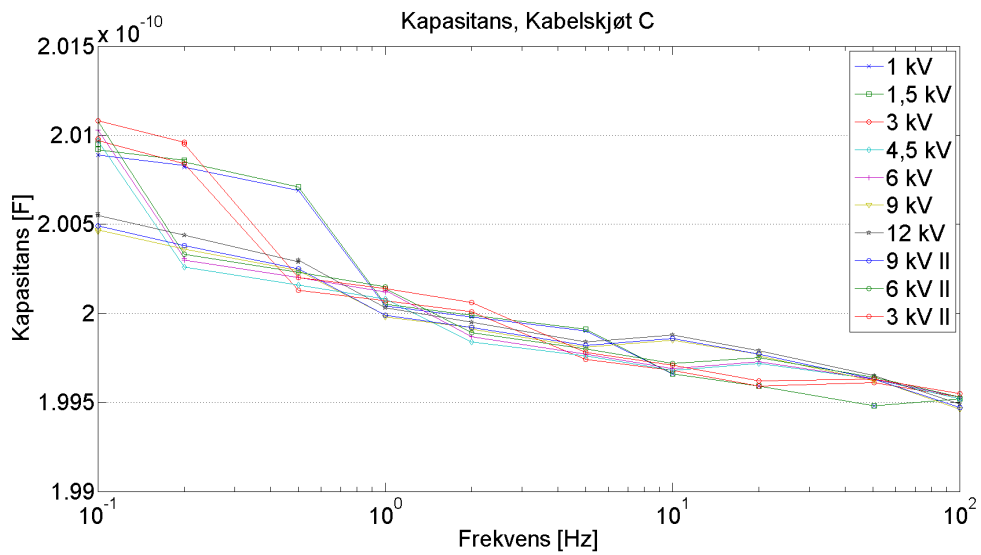


Figur F.21: Realdelen av kapasitansen i Kabelskjøt B

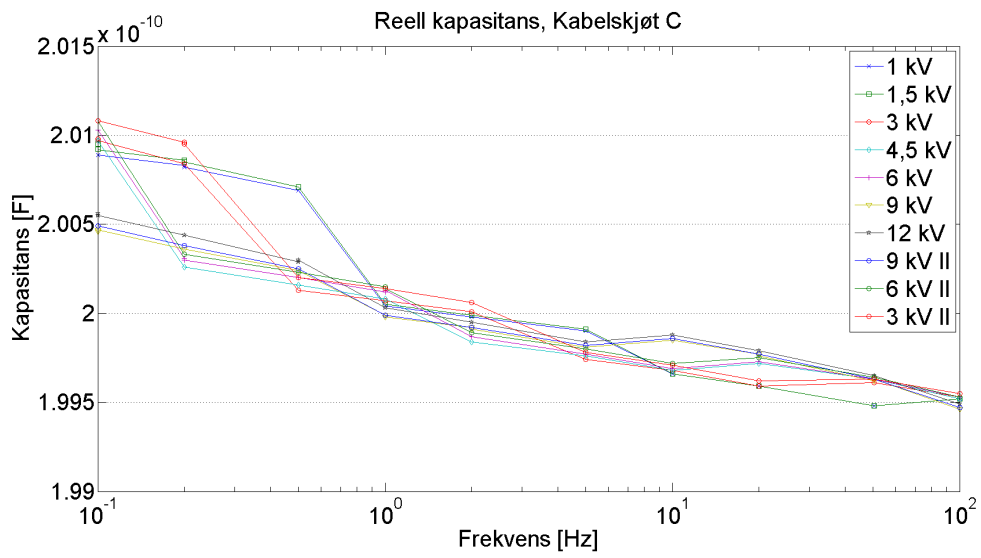


Figur F.22: Imaginærdelen av kapasitansen i Kabelskjøt B

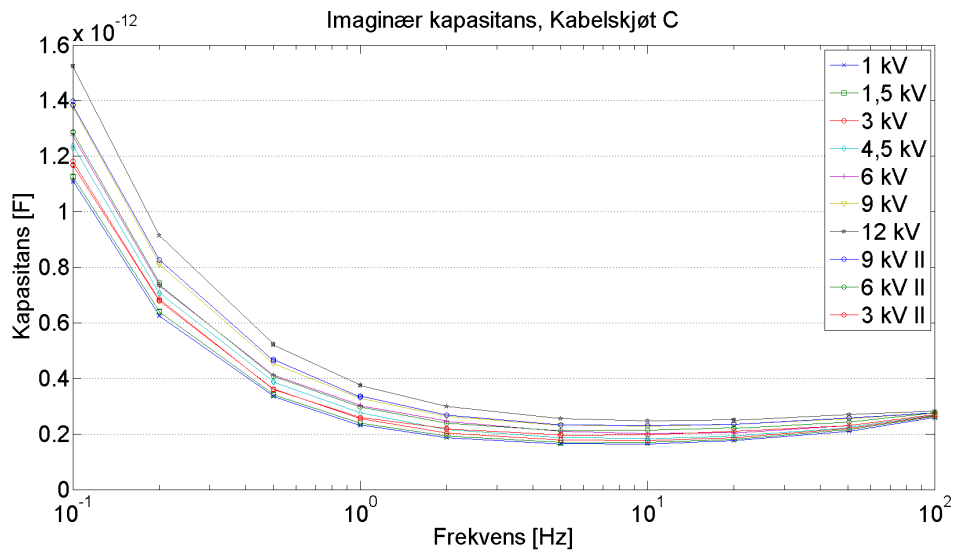
F.2.3 Kabelskjøt C



Figur F.23: Kapasitans, Kabelskjøt C

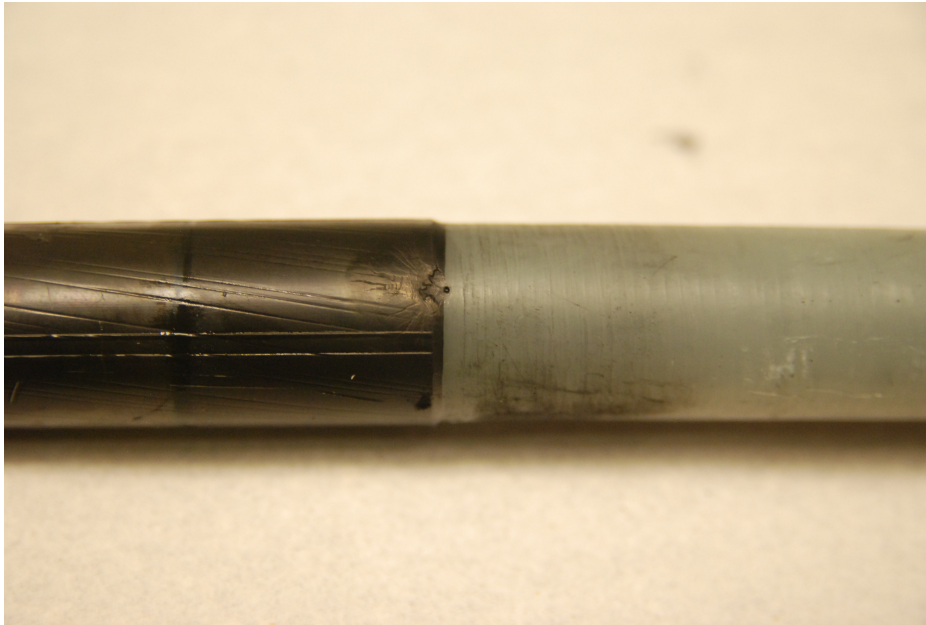


Figur F.24: Realdelen av kapasitansen i Kabelskjøt C

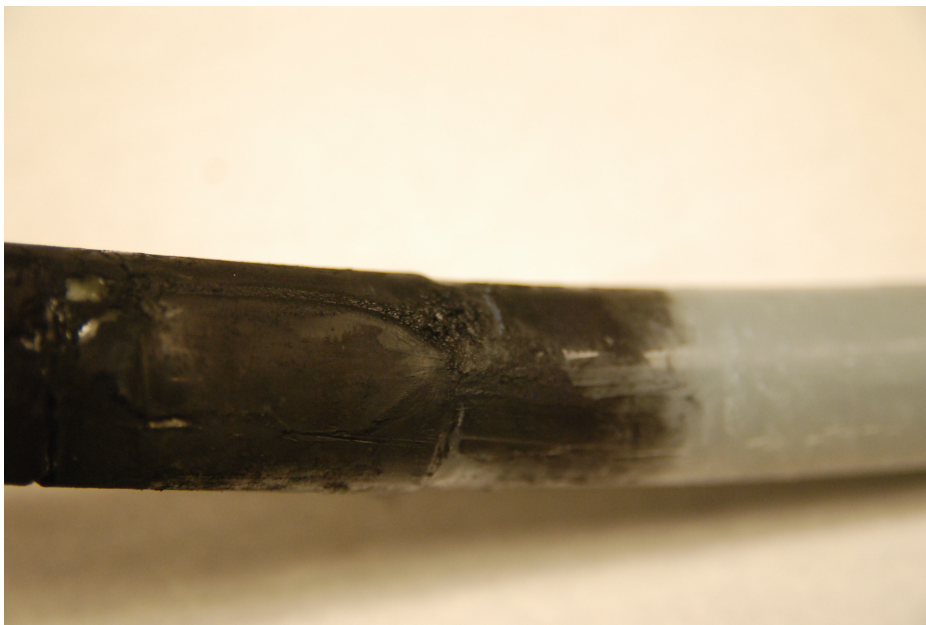


Figur F.25: Imaginærdelen av kapasitansen i Kabelskjøt C

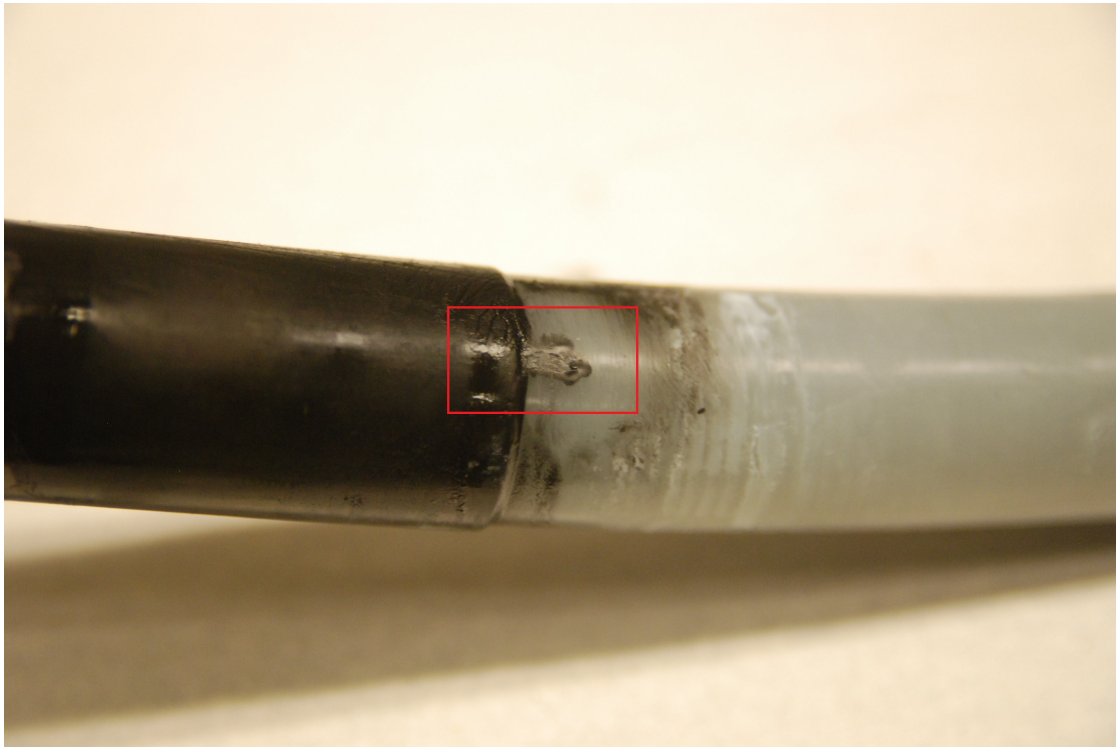
G Disseksjon



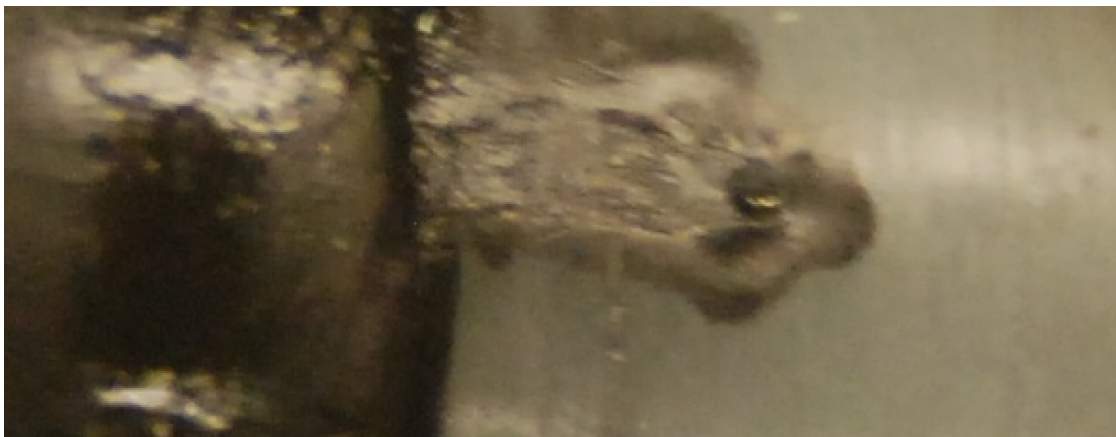
Figur G.1: Gjennomslagsområde i Kabelskjøt A.



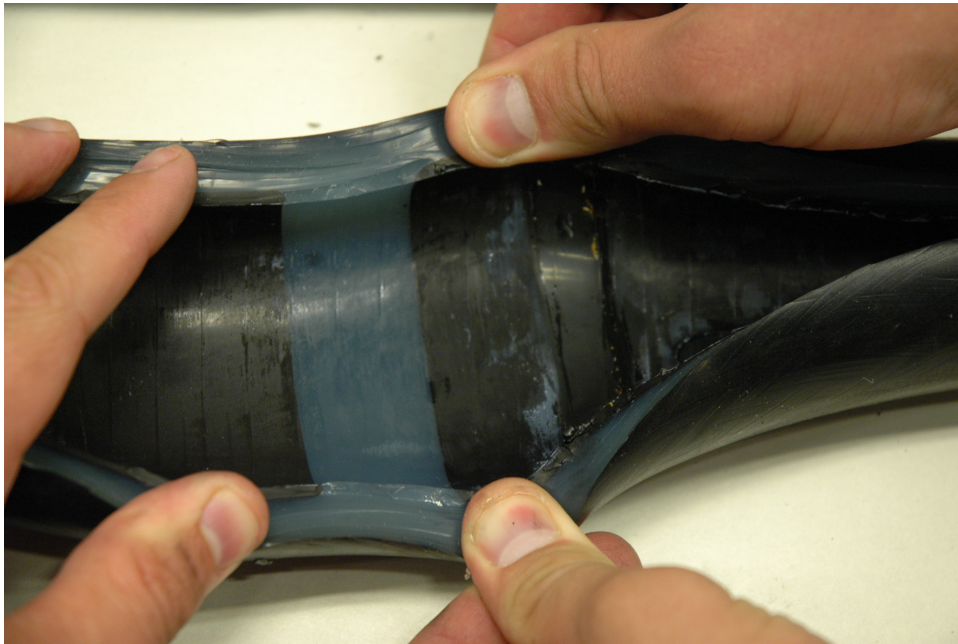
Figur G.2: Gjennomslagsområde i Kabelskjøt B.



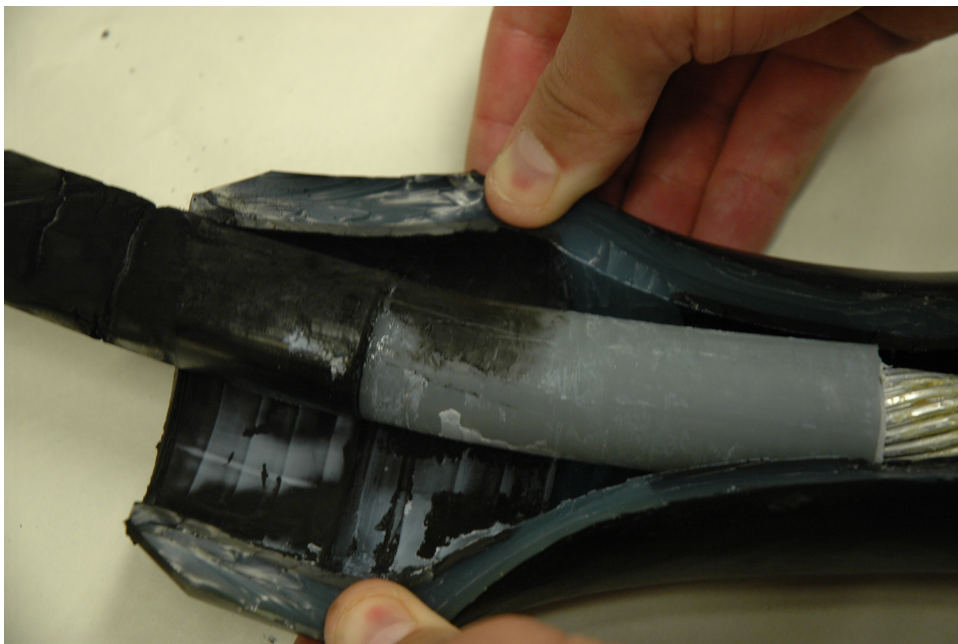
Figur G.3: Gjennomslagsområde i Kabelskjøt C.



Figur G.4: Gjennomslagsområde i Kabelskjøt C.



Figur G.5: Innsiden av skjøten, i området med feltstyring.



Figur G.6: Overgangen fra halvleder til isolasjonen i Kalbelskjøt B. Det sotede området på isolasjonen kommer fra gjennomslaget.