

Partielle utladningar og elektrisk trevekst i kryssbunden polyetylen og polypropylen isolasjon

Ingeborg Lunde

Master i energi og miljø

Innlevert: Juni 2012

Hovedveileder: Erling Ildstad, ELKRAFT

Noregs teknisk-naturvitskaplege universitet
Institutt for elkraftteknikk

Oppgåvetekst

Dei fleste ekstruderte AC kraftkabler er i dag isolert med kryssbunden polyetylen (PEX). Eit materiale som har veileigna mekaniske og gode elektriske eigenskapar opp til ein maksimal driftstemperatur på 90°C. I samanheng med spesielle høgtemperaturanvendelsar, til dømes i samanheng med røyr-oppvarming og andre offshore anvendelsar, er det behov for høgspenningskabler som kan bli belasta ved høgare maksimale driftstemperaturar enn dagens PEX-kablar.

Polypropylen (PP) vil kunne vere et slikt alternativt høgtemperatur isolasjonsmateriale. Til no har PP kun vorte nytta som tynne filmar i høgspenningskabel- og kondensatorisolasjon. Dette skyldast fyrst og fremst PP materialet sin høge elastisitetmodul og smeltepunkt. Det gjer framstillinga krevjande og fører til at ekstrudert isolasjon blir stiv og uhandterleg. Nye typar PP materiale, som syndiotaktisk polypropylen (s-PP), er meir fleksibel og ekstruderbar, det gjer det svært aktuelt å undersøke moglegheitene og avgrensingar knytta til PP som høgspenningsisolasjon for kablar.

s-PP er eit ekstruderbart polymermateriale med høg elektrisk haldfastheit og låge dielektriske tap. Men korleis isolasjonsmaterialet sine elektriske eigenskapar blir påverka av ulike typar forureiningar er til no lite undersøkt. -Masteroppgåva er ein del av eit NFR/industri støtta prosjekt ved NTNU/SINTEF Energi, der målsettinga er å utvikle nye design kriterie for slik PP kabelisolasjon. Hovudformålet med denne masteroppgåva er derfor å studere danninga av elektriske tre både i ekstruderbar s-PP og PEX. Det skal bli lagt spesiell vekt på undersøking av samanhengen mellom partiell utladningsaktivitet og danninga av elektriske tre.

Oppgåva vil gå ut på å:

1. Gje ei litteraturoversikt over gjennomslagsmekanismar og danninga av elektriske tre i PEX og om mogleg også i PP isolasjon. Det skal spesielt bli fokusert på korleis material karakteriska, som til dømes mekanisk styrke og tracking-motstand, vil kunne innverke på trea si form, utladningsaktivitet og tid til elektrisk gjennomslag.

2. Lage egne PP og PEX testobjekt med innstøpte nåler, samt bygge og utprøve målekrins for eksperimentell undersøkning av sammenhengen mellom partiell utladningsaktivitet og danninga av elektriske tre.
3. Foreta eksperimentell kartlegging av og samanlikning av danninga av elektriske tre, utladningsnivå og tid til gjennomslag i s-PP og PEX testobjekt.
4. Drøfte resultatata i lys av litteratur og egne antakingar.

Det detaljerte prøveprogrammet blir fastlagt i samarbeid med rettleiarane.

Start: 30. januar 2012
Innlevering: 25. juni 2012

Faglærer: Prof. Erling Ildstad (Erling.Ildstad@elkraft.ntnu.no)
Medrettleiar: Stip.Jorunn Hølto (Jorunn.Holto@elkraft.ntnu.no)

Føreord

Denne masteroppgåva er ein del av eit NFR/industri støtta prosjekt ved NTNU/SINTEF Energi, der målsetjinga er å utvikle nye design kriterie for kabelisolasjon av PP. Arbeidet har blitt utført ved Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet (NTNU), ved institutt for Elkraftteknikk våren 2012.

Eg vil gjerne rette ein stor takk til rettleiarane mine, Professor Erling Ildstad og Stipendiat Jorunn Høltø, for hjelp både teoretisk og praktisk i laboratoriet.

Under arbeidet med denne oppgåva har eg hatt god hjelp av tilsette både på NTNU og SINTEF. I den praktiske gjennomføringa av oppgåva har eg fått hjelp av avdelingsingeniør Bård Almås og Horst H. Førster som er forsker på SINTEF. Dei har vore til stor hjelp, spesielt ved oppsett av den elektriske krinsen og tilkopling av utstyr. Overingeniør Vladimir Klubicka og overingeniør Kurt Salmi har stilt med si ekspertise når eg har støytt på datautfordringar, noko eg har sett stor pris på. Utover dette vil eg takke medstudent Hans L. Halvorsen for god opplæring i bruken av omicron PD-målesystem og medstudent Lars Møllersen Hallsteinsen for trivelege stunder på kontoret.

Det har vore moro å utføre praktiske eksperiment på NTNU/SINTEF, spesielt når ein blir så godt teke vare på og dei tilsetje tek deg på alvor.

Trondheim, 20. juni 2012

Ingeborg Lunde

Ingeborg Lunde

Samandrag

Kryssbunden polyetylen (PEX) er den mest brukte polymerisolasjonen i Noreg. PEX blir brukt i kablar opp til 420 kV. Auka spenningsnivå i høgspenningskablar gjev auka termiske påkjenningar og PEX kablar har ein maksimal driftstemperatur på 90 °C. Framover vil det bli behov for kablar som kan tåle høgare driftstemperaturar. I denne oppgåva blir polymeren syndiotaktisk polypropylen (s-PP) undersøkt til bruk som isolasjon i høgspenningskablar, spesielt ved høge temperaturar. s-PP har ein smeltetemperatur på 130 °C, låge dielektriske tap og høg gjennomslagsstyrke [22].

For å halde ynskt driftsikkerheit på høgspenningskablar av polymerar er det viktig med kunnskap om nedbrytingsmekanismar som elektrisk trevekst. Hovudformålet i denne oppgåva har vore å studere samanhengen mellom danninga av elektriske tre og partielle utladningar i både PEX og s-PP. Eigne testobjekt av både PEX og s-PP har vorte produsert. I testobjekta er det brukt stålnåler som elektrode for å skape område med lokal feltforsterking. Elektrisk trevekst har blitt undersøkt ved 8 kV, 10 kV og 12 kV, med ein frekvens på 50 Hz.

Resultat frå denne oppgåva viser at elektriske tre i PEX og s-PP har ulik form. I PEX endrar treet form frå greinstruktur ved 8 kV til buskstruktur ved 10 kV og 12 kV. Det vil sei at antall forgreiningar aukar med auka spenning. Tid fram til gjennomslag aukar frå 7 minutt og 12 sekund ved 8 kV til 34 minutt og 30 sekund ved 12kV. Elektriske tre i s-PP derimot har greinform både ved 8 kV, 10 kV og 12 kV. Greinstruktur i s-PP skil seg frå greinstruktur i PEX, den har færre forgreiningar fram til treet når jord. Tida treet brukar for å nå jordelektroda minkar med auka spenning, i motsetnad til elektriske tre i PEX, frå 9 minutt og 36 sekund ved 8 kV til 2 minutt og 54 sekund ved 12 kV. Oppsiktsvekkande resultat for elektriske tre i s-PP er at dei ikkje nødvendigvis fører til gjennomslag idet fyrste grein når jordelektrode. Nye greiner vil fortsetje å vekse parallelt fram til jordelektroden til det blir gjennomslag. Tid til gjennomslag har stor variasjon, men minkar i gjennomsnitt frå 3 timar og 47 minutt ved 8 kV til 5 minutt ved 12 kV.

Det er observert ein korrelasjon mellom partielle utladningar og elektrisk trevekst. For elektriske tre i PEX, der det er flest forgreiningar og stor tettleik

av greiner, er dei partielle utladningane større enn dei er for s-PP. Ved 10 kV er den maksimale PD-amplituden ti gonger større i PEX enn for s-PP. Ved auka spenning frå 8 kV til 12 kV i PEX aukar antall forgreiningar og maksimal PD-amplitude går frå omlag 350 pC til 900 pC. Elektriske tre i s-PP derimot har lita endring i antall forgreiningar og den maksimale PD-amplituden held seg rundt 70 pC ved auka spenning.

Abstract

Today cross-linked polyethylene (XLPE) is the most used polymer in high voltage insulation in Norway. XLPE is used in cables up to 420 kV. Increasing voltages in high voltage cables leads to increased thermal stress, and the maximal operating temperature in XLPE is 90 °C. Increased voltage demands in the future will require higher operating temperatures. Syndiotactic polypropylene (s-PP) is being considered as an alternative to XLPE insulation, particularly for high temperature cable applications. s-PP has melting point of 130 °C, low dielectric losses and high breakdown strength [22].

The main goal of this report has been to study the relationship between electrical treeing and partial discharges in both XLPE and s-PP insulation. Test objects have been produced, where steel needles have been used as electrode to make a locally strong electrical field.

The results of this study show a difference in the electrical treeing in XLPE and s-PP. The shape of electrical trees in XLPE changes from branch to bush trees between 8 kV and 10 kV. This means that the number of branches increases with increasing voltage. For XLPE, the time to breakdown (TBD) increases from 7 minutes and 12 seconds at 8 kV, to 34 minutes and 30 seconds at 12 kV. s-PP has on the other hand branch trees at 8 kV as well as 10 kV and 12 kV. The branch structure in s-PP is different from that in PEX, with fewer sidebranches. The time for the tree to reach the ground electrode decreases with increasing voltage from 9 minutes and 36 seconds at 8 kV to 2 minutes and 54 seconds at 12 kV. A surprising result is that electrical treeing in s-PP does not necessary cause electrical breakdown when the first branch reaches the ground electrode. Parallel branches continue to develop until final electric breakdown is reached. Furthermore, the time to breakdown has varied significantly. In average, the time to breakdown is decreasing from 3 hours and 47 minutes at 8 kV to 5 minutes at 12 kV.

A correlation between electrical treeing and partial discharges is found. The electrical trees develops a denser structure in XLPE than in s-PP. In addition, larger partial discharge amplitude have been observed in XLPE. The PD magnitudes were about 10 times higher in XLPE than in s-PP at 10 kV. When increasing the voltage from 8 kV to 12 kV, the number of branches

increased in XLPE. At the same time, the PD magnitudes were increasing from about 350 pC to 900 pC. The shape of electrical trees in s-PP does not seem voltage dependent. The PD activity is low, with magnitudes less than 70pC.

Innhold

1	Innleiing	1
1.1	Bakgrunn	1
1.2	Arbeid	2
1.3	Publikasjonar	3
2	Litteratur	5
2.1	Partielle utladningar	5
2.2	Elektrisk trevekst	8
2.3	Forhold som påverkar elektrisk trevekst	9
2.3.1	Trestruktur i endring	9
2.3.2	Holrom i endring	12
2.4	Isolasjonsmateriale	15
2.5	Resultat frå forskning på elektriske tre	17
3	Metode	21
3.1	Produksjon av testobjekt	22
3.2	Oppsett av krins for å detektere PD og elektrisk trevekst	24
3.3	Innstilling av måleutstyr	27
3.4	Kalibrering	28
3.5	Analyse	29
3.5.1	Elektriske tre	29
3.5.2	Partiell utladning	30
3.6	Undersøking av isolasjonen sin morfologi	32
4	Resultat	33
4.1	Elektriske tre sin utsjånad	33
4.1.1	Kryssbunden polyetylen	33
4.1.2	Syndiotaktisk polypropylen	35
4.2	Vekstkarakteristikk for elektriske tre i PEX og s-PP	36
4.3	Korrelasjon mellom elektrisk trevekst og PD	39
4.3.1	Kryssbunden polyetylen	39
4.3.2	Syndiotaktisk polypropylen	41
4.3.3	PD-mønster	42
4.4	Material	44

4.4.1	Morfologi	44
4.4.2	Mekanisk spenning	44
5	Diskusjon	47
6	Konklusjon	53
6.1	Vidare arbeid	54
	Vedlegg A Kalibrering	57
	Vedlegg B Vassavkjøling av testobjekt	59
	Vedlegg C PD og trevekst	61
C.1	Testobjekt av s-PP og 8 kV påtrykt spenning.	62
C.2	Testobjekt av PEX og 8 kV påtrykt spenning.	63
C.3	Testobjekt av s-PP og 12 kV påtrykt spenning.	64
C.4	Testobjekt av PEX og 12 kV påtrykt spenning.	65
	Vedlegg D Matlab kode	67
	Vedlegg E Publikasjon	69

Liste over figurar

1.1	Eksempel på område med forsterka elektrisk felt	2
2.1	Krins for deteksjon av PD [15].	6
2.2	Elektrisk ekvivalent av testobjektet.	7
2.3	PD-signal i holrom [2].	7
2.4	PD-aktivitet i forhold til påtrykt spenning [24].	8
2.5	Elektrisk feltstyrke ved nålespissen. $U = 10$ kV og $f = 50$ Hz $d = 1,2$ mm.	10
2.6	RC-modell av eit elektrisk tre som veks mot jordelektrode. Treet er ekvivalent som ein motstand og isolasjonen mellom trespiss og plan er ekvivalent som ein kapasitans.	10
2.7	Forholdet mellom spenning ved treet sin spiss som funksjon av total resistans i trekanalane. U_0 har frekvensen 50 Hz og $C_1 = 4,9 \cdot 10^{-4}$ pC, $C_2 = 4,9 \cdot 10^{-3}$ pC og $C_3 = 4,9 \cdot 10^{-2}$ pC.	11
2.8	Illustrasjon over elektrisk trevekst. Greinene i trestrukturen er nummerert ut i frå tidspunktet dei vaks fram [15].	13
2.9	Paschenkurve [4].	14
2.10	PE sin molekylstruktur.	15
2.11	i-PP og s-PP sin molekylstruktur [16].	16
2.12	Danning av sfærolittar i PP [14].	16
2.13	Trestruktur i PEX ved ulike spenningsnivå [24].	18
2.14	Resultat frå Ytterstad sine forsøk av testobjekt av PEX [23].	19
2.15	Trevekst i s-PP [7].	20
3.1	Form som vert brukt til å lage testobjekt.	22
3.2	Pressemaskin, <i>Genesis Wabash</i>	23
3.3	Oppsett av krins i høgspenningslaboratorie på NTNU.	25
3.4	Skisse over oppsett av krins for elektriske tre og partielle ut- ladingar.	25
3.5	Mikroskop.	26
3.6	Kalibrering av målekrins.	28
3.7	Målefunksjon i NIS elements BR	29

3.8	PD-aktivitet i faseplott på oscilloskop, påtrykt spenning $U_{eff} = 10$ kV.	30
3.9	PD-aktivitet i faseplott frå PD-system2.	31
3.10	Morfologien til testobjekt av s-PP etter støyping.	32
4.1	Utvikling av greinstruktur i PEX ved 8 kV.	33
4.2	Utvikling av buskstruktur i PEX ved 12 kV.	34
4.3	Tverrsnittet av elektriske tre i PEX.	34
4.4	Utvikling av greinstruktur i s-PP ved 8 kV. Tida startar å telle idet initieringa er over.	35
4.5	Tverrsnitt av trestruktur i s-PP etter gjennomslag. Tverrsnittet er 0,6mm frå jordelektroda.	35
4.6	Trekanal i tilknytning til jordelektrode i s-PP ved 12 kV påtrykt spenning.	36
4.7	Oversikt over TG og TBD for elektriske tre i s-PP og PEX. Gjennomsnitts-, maksimal- og minimumsverdi, som funksjon av spenning, er presentert med logaritmisk x-akse. Initieringstida er ikkje inkludert.	37
4.8	Gjennomsnittleg total breidde til elektriske tre i PEX og s-PP som funksjon av spenning med maksimal- og minimumsverdi.	37
4.9	Lengda si utvikling som funksjon av breidda til elektrisk tre i s-PP og PEX. Verdiane er gjennomsnittet frå alle testobjekt for dei ulike spenningsnivåa.	38
4.10	Resultat frå måling med PD-system1 og treet sin vekst for PEX. Påtrykt spenning er 10 kV og tida startar å telle idet initieringstida er over.	40
4.11	Maksimal ladning og mengde PD som funksjon av tid målt med PD-system2 for PEX. Påtrykt spenning er 10 kV og tida startar å telle idet initieringstida er over.	40
4.12	Resultat frå måling med PD-system1 og treet sin vekst for PP. Påtrykt spenning er 10 kV og tida startar å telle idet initieringstida er over.	41
4.13	Maksimal ladning og mengde PD som funksjon av tid målt med PD-system2 for s-PP. Påtrykt spenning er 10 kV og tida startar å telle idet initieringstida er over.	42
4.14	Typiske PD-mønster i s-PP og PEX	43
4.15	Morfologien til testobjekt av s-PP etter støyping.	44
4.16	Mekaniske spenningar i PEX og s-PP.	45
B.1	Temperaturrendring ved avkjøling av testobjekt	59
C.1	Resultat frå måling av PD med PD-system1 og treet si vekst for s-PP. Påtrykt spenning er 8 kV og tida startar å telle idet initieringstida er over.	62

C.2	Resultat frå måling av PD med PD-system1 og treet si vekst for PEX. Påtrykt spenning er 8 kV og tida startar å telle idet initieringstida er over.	63
C.3	Resultat frå måling av PD med PD-system2 og treet si vekst for PEX. Påtrykt spenning er 8 kV og tida startar å telle idet initieringstida er over.	63
C.4	Resultat frå måling av PD med PD-system1 og treet si vekst for s-PP. Påtrykt spenning er 12 kV og tida startar å telle idet initieringstida er over.	64
C.5	Resultat frå måling av PD med PD-system2 og treet si vekst for s-PP. Påtrykt spenning er 12 kV og tida startar å telle idet initieringstida er over.	64
C.6	Resultat frå måling av PD med PD-system1 og treet si vekst for PEX. Påtrykt spenning er 12 kV og tida startar å telle idet initieringstida er over.	65

Liste over tabellar

2.1	Målte materialeegenskapar [12].	17
2.2	Resultat frå Chen si forskning på PEX [3].	18
3.1	Innstilling av presse.	24
A.1	Måling av støynivå i målekrins	57
A.2	Kalibrering av PD-måling	57

Definisjonar

PD	- Partiell utladning (Partial Discharge)
PP	- Polypropylen
s-PP	- Syndiotaktisk polypropylen
PE	- Polyetylen
PEX	- Kryssbunden polyetylen
TG	- Tid til fyrste grein når jordelektrode (Time to Ground)
TBD	- Tida til gjennomslag (Time to Breakdown)
PD-system1	- Måling av PD med ein shuntmotstand og registrering ved hjelp av oscilloskop
PD-system2	- Måling av PD med Omicron målesystem

Kapittel 1

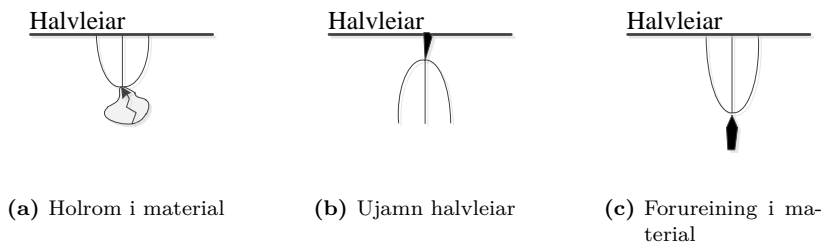
Innleiing

1.1 Bakgrunn

Eit samspel av fleire påkjenningsmekanismar vil bryte ned eit materiale over tid. I høgspenningsutstyr kan overspenning og driftspenning gje kjemiske- og termiske påkjenningar. Mekanisk belastning kan og gje gradvis nedbryting [11]. Under tørre driftsforhold er elektriske tre ein av hovudårsakene til at material vert brote ned over lang tid [11]. Det er ynskjeleg å ha pålitelege og driftsikre kablar med lang levetid. For å oppnå dette er det naudsynt med kunnskap om nedbrytingsmekanismar som elektriske tre.

Elektriske tre oppstår i områder med forsterka elektrisk felt. Forsterka elektriske felt kan oppstå i materialet der det er holrom fylt med gass eller væske, partiklar eller leiande materiale. Desse områda kjem mellom anna av ujamn krystallisering eller støyping av isolasjonsmaterialet, forureining, Maxwellkrefter, elektrokjemiske- eller mekaniske påkjenningar eller elektrodekontakt. Eksempel på dette er skissert i figur 1.1. Ved produksjon av isolasjonsmateriale er det viktig å unngå slike områder, men i praksis er det så og seie umogleg.

Kryssbunden polyetylene (PEX) er den mest brukte isolasjonen i kablar med ekstrudert isolasjon [24]. I 2004 var PEX-kabel i Noreg einerådande på alle spenningsnivå opp til 132 kV og det var anbefalt å bruke PEX-kabel på spenningsnivå opp til 420 kV på land og 132 kV for sjøkabel. Likevel er det i Noreg enno liten andel PEX-kablar for høgare spenningsnivå som 300 kV og 420 kV. Dei fleste anlegga med så høge spenningar har vorte installert med oljeimpregnerte kablar med papirisolasjon [19]. Ved høge spenningsnivå må slike kablar ha tjukk isolasjon for å oppnå ein akseptabel levetid. Det fører til at kablane blir tunge, stive og dyre. Ut i frå dette er det heller ynskjeleg å bruke kablar med polymerisolasjon ved nye utbyggingar [11]. PEX har gode isolerande eigenskapar, men ved temperatur over 90°C vil materialet sine



Figur 1.1: Eksempel på område med forsterka elektrisk felt

elektriske eigenskapar bli svekka, maksimal driftstemperatur er derfor 90°C . For kablar med høgare driftstemperatur er syndiotaktisk polypropylene (s-PP) ein aktuell kandidat som isolasjon. s-PP er ein ekstruderbar polymer med ein smeltetemperatur på 130°C . Den har låg permittivitet og dielektriske tap, og høg mekanisk og elektrisk gjennomslagsstyrke [22].

Denne masteroppgåva er ein del av eit forskingsprosjekt ved NTNU/SINTEF og vil undersøke korrelasjonen mellom elektriske tre og partielle utladningar i kryssbunden polyetylen og syndiotaktisk polypropylen.

1.2 Arbeid

Elektriske tre blir inititert i område med forsterka elektriske felt. I forsøka vil ei metallnål bli brukt som elektrode for å skape eit forsterka elektrisk felt ved nålespissen. Denne masteroppgåva vil undersøke elektrisk trevekst og partielle utladningar i både s-PP og PEX ved 8 kV, 10 kV og 12 kV påtrykt spenning og med ein frekvens på 50 Hz.

Arbeidet i denne oppgåva er i hovudsak delt inn i tre; litteraturstudie, eksperiment og diskusjon. Litteraturstudiet vert presentert i kapittel 2. Dette kapitlet prøver å finne svar på oppgåva ved hjelp av allereie eksisterande forsøk og teori. Deretter vil det gjennom kapittel 3 og kapittel 4 bli forklart korleis eigne eksperiment har vorte utført og kva resultat dei har gjeve. Til slutt vil den teoretiske og eksperimentelle delen bli samanlikna og diskutert i kapittel 5, Diskusjon.

Denne masteroppgåva er ei vidareføring av eit forprosjekt som vart utført hausten 2011. Prosjektrapporten hadde tittelen *Partielle utladningar og Elektrisk trevekst i Polypropylen* med Erling Ildstad og Jorunn Hølto som rettleiarar. Det var gjort forsøk med testobjekt av s-PP under 10 kV påtrykt spenning og frekvens på 50 Hz. Resultata frå dette arbeidet er teke med vidare i denne masteroppgåva i kapittel 4.

1.3 Publikasjonar

Ein artikkel [8] som byggjar på resultat frå denne masteroppgåva vil bli presentert på *International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE)*, som i år vil bli arrangert i Shanghai den 17. til 20. september. Artikkelen har tittel *Characteristics of Electrical Treeing in Extruded Polypropylene and Cross-Linked Polyethylene Cable Insulation* og forfattarane er, Jorunn Hølto, Erling Ildstad og Ingeborg Lunde. Artikkelen finnst som vedlegg E.

Kapittel 2

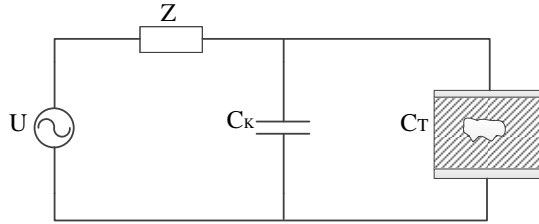
Litteratur

Dette kapitlet vil setje lys på kva som allereie er publisert om elektrisk tre i PEX og s-PP og kva samanhengar som kan finnast mellom elektriske tre og partielle utladningar. Hovudformålet er å kunne forklare kva slag ulikskapar som oppstår i PEX og s-PP og korleis dei blir danna.

2.1 Partielle utladningar

Partielle utladningar (PD) er elektriske utladningar som kun lagar delvise gjennomslagskanalar i isolasjonsmateriale mellom to elektrodar. Utladningane treng ikkje vere i kontakt med elektrodene. Ved produksjon av isolasjonsmateriale er det ikkje til å unngå at defektar, som illustrert i figur 1.1, blir danna. Slike defektar gjev opphav til PD og vil kunne føre til danning av holrom. Holrom fylt med gass vil oppleve eit sterkare elektrisk felt enn den omkringliggjande polymeren, dette er på grunn av at gassen sin permittivitet er lågare enn polymeren sin permittivitet. Avhengig av mellom anna holrommet sin storleik, gasstrykket og det elektriske feltet vil spenninga over holrommet setje i gang PD. Ei partiell utlading varar mindre enn $1 \mu\text{s}$ og er nærast umogleg å oppdage med det blotte auge. Ved påvising av PD blir det teke utgangspunkt i energiutvekslinga som skjer ved ei utlading. Det kan vere energi i form av elektrisk straumpulsar, dielektriske tap, stråling som kan sjåast som lys, lyd, auka gasstrykk og kjemiske reaksjonar. Dei mest brukte metodane for å påvise PD er dei som tek inn informasjon frå elektriske impulsar [5] [15] [11].

Figur 2.1 viser eit oppsett for påvising av PD ved hjelp av elektriske impulsar. Testobjektet er representert med kapasitansen C_t med ein kapasitans C_k kople i parallell. Ved deteksjon av PD vil impedansen, Z , i den elektriske krinsen, dersom den er induktiv, kople testobjektet og den parallelle



Figur 2.1: Krins for deteksjon av PD [15].

koplingsimpedansen frå spenningskjelda i det augneblink PD opptrer. Under denne korte tidsperioda vil C_k opptre som ei stabil spenningskjelde. Den vil prøve å oppretthalde spenninga over testobjektet. Dersom $C_k \gg C_t$ vil spenningsfallet bli fullstendig kompensert. Ladinga som vert overført frå C_k til C_t vert nemnt som den tilsynelatande ladinga, q_s , og er ikkje lik den ladinga som vert frigjeve i holrommet. Det er denne tilsynelatande ladinga som vert målt under påvising av PD [15] [11].

Ved utrekning av den tilsynelatande ladinga er det føremålstenleg å lage ein elektrisk modell av sjølve testobjektet, som vist i figur 2.2. Holrommet sin kapasitans er representert som kapasitansen c . Isolasjonen i serie med holrommet er representert som kapasitansen b og den resterande isolasjonen i testobjektet er representert som kapasitansen a , der $b < c$ og $c \ll a$ [11].

Under ei partiell utlading i holrommet vil spenninga over holrommet bli redusert med spenninga ΔU_h . I dette tidsrommet vil den elektriske kretsen bli kopla frå den eksterne kretsen som vist i figur 2.2b. Spenningsfallet kjem av ei ladingstilføring som kan bli rekna ut som følgjer [11]:

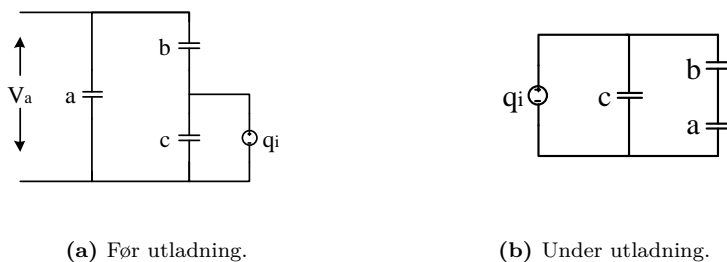
$$q_i = \Delta U_h \left(c + \frac{ab}{a+b} \right) \approx \Delta U_h (b+c) \quad (2.1)$$

Ladinga q_i vil ikkje kunne bli detektert, men eit lite spenningsfall over kapasitans a vil kunne registrerast. Denne spenninga finnes som vist i likning 2.2 [11].

$$\Delta U_t = \frac{b}{a+b} \Delta U_h \approx \frac{b}{a} \Delta U_h \quad (2.2)$$

Ut i frå dette kan det reknast ut kor stor den tilsynelatande ladinga må vere for å gjenopprette spenninga over holrommet [11].

$$q_s = \Delta U_t \left(a + \frac{bc}{b+c} \right) \approx \Delta U_t \cdot a \approx b \cdot \Delta U_h \quad (2.3)$$

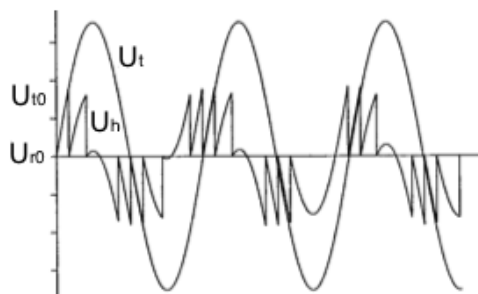


(a) Før utlading.

(b) Under utlading.

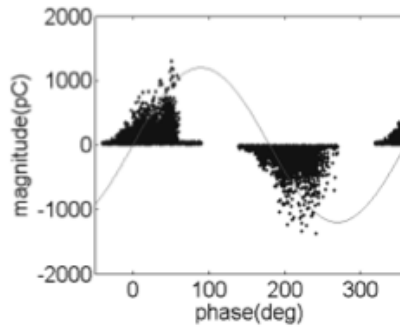
Figur 2.2: Elektrisk ekvivalent av testobjektet.

Med AC påtrykk vil PD-signala opptre i kvar halvperiode dersom spenninga over holrommet overskrider tennspenninga, U_{t0} . Antall utladningar per halvperiode kan variere, det er avhengig av den påtrykte spenninga sin storleik, spenningsfallet sin storleik ved ei utlading, holrommet sin storleik og innhald. Når spenninga over holrommet når tennspenninga vil fyrste utlading finne stad. Då vil spenninga i holrommet falle ΔU_h til spenning U_{r0} . PD-aktivitet i holrommet vil opptre rundt spenninga sitt nullpunkt [17]. Døme på korleis slik PD-aktivitet opptre er vist i figur 2.3.

**Figur 2.3:** PD-signal i holrom [2].

Chen, Zhou og Liao har undersøkt PD-signal i PEX kablar og nytta nåler for å skape forsterka elektrisk felt [24]. Deira resultat viser PD-aktivitet ved $30^\circ - 80^\circ$ og $150^\circ - 260^\circ$ forhold til den påsette spenninga. Dette er presentert i figur 2.4.

Partielle utladningar er drivkrafta bak danninga av elektriske tre. Dersom tilstrekkeleg energi blir frigjeve under partielle utlading vil gassen i holrommet bli ionisert. Elektron og ion blir akselerert over holrommet. Dersom dei blir tilført nok energi frå det elektriske feltet vil dei kunne bryte ned kjemiske bindingar i polymeren ved kollisjon med holrommet sin vegg. Då vil nye elektron og ion kunne bli frigjeve, dei vil på ny bli akselerert [5].



Figur 2.4: PD-aktivitet i forhold til påtrykt spenning [24].

Materialet sin motstandskraft spelar her ei rolle på kor fort nedbrytinga vil skje. Ved å samanlikne den lagra energien i eit holrom før og etter utladning kan det finnast eit uttrykk for kor stor energi ei enkelt utladning har tilført holrommet. Likning 2.4 viser korleis energien frå ei utlading er bestemt av den tilsynelatande ladninga q_s og U_s . U_s er eit uttrykk for kor liten den påtrykte spenninga kan vere før utladingane i holrommet opphøyrer [11].

$$\Delta W = \sqrt{2}U_s \cdot q_s \quad (2.4)$$

2.2 Elektrisk trevekst

Ved skildring av elektriske tre i PEX blir det ofte valt å dele inn veksten i tre fasar: initieringsfase, vekstfase og gjennomslag [11]. Lengda på kvar av fasane er avhengig av påtrykt spenning, frekvens og testobjektet sin geometri. [5].

Initieringsfasa er omtala som tida frå det elektriske feltet overgår ein grenseverdi til eit elektrisk tre byrjar å vekse [9]. Under initieringstida kan det ikkje påvisast nedbryting av materialet, men ved høg nok spenning kan emisjon av lys registrerast [13]. Fleire mekanismar kan vere årsak til at eit tre blir initiert. Mellom anna kan det elektriske feltet ved nålespiss vere stort nok til å initiere partielle utladningar i holrom på mikrometerstorleik ved nålespiss. Mekaniske påkjenningar produsert rundt nålespiss på grunn av Maxwellkrefter kan svekke isolasjonen eller romladningar kan gje lokale feltforsterkingar som vil føre til elektrisk trevekst [20]. Idet det elektriske treet kan observerast startar vekstfasa til det elektriske treet. PD-aktivitet er naudsynt for at treet skal vekse og er årsaka til at isolasjonsmaterialet blir brote ned. Materialet blir brote ned til ulike typar gassar og karbon. Samansetninga av gassane og mengde karbon vil påverke vidare PD-aktivitet, slik det er forklart i kapittel 2.3.2. Når den elektriske feltstyrka overgår gjennomslagsstyrka til isolasjonen mellom trespiss og jordelektrode vil det bli gjennomslag.

2.3 Forhold som påverkar elektrisk trevekst

Frå elektriske tre blir initiert i eit polymermaterial fram til gjennomslag vil forholda for PD vere under endring. Når materialet blir aldra vil materialet sine eigenskapar bli endra og det vil i sin tur påverke PD-aktiviteten. Dette blir påpeika av Morshuis [1] i ein rapport frå 2005. Han oppsummerer forskningsresultat frå dei siste 10-20 åra kring aldring av fast isolasjonsmateriale grunna PD . Dette kapittelet vil ta for seg slike forhold som vil påverke PD-aktivitet og elektrisk trevekst.

2.3.1 Trestruktur i endring

Idet treet startar å vekse frå nålespissen i eit nål-plan oppsett kan trestrukturen bli sett på som ei forlenging av den elektrisk leiande nåla. Trestrukturen sin konduktivitet og storleik vil påverke spenninga ved treet sin spiss [1].

Elektrisk felt

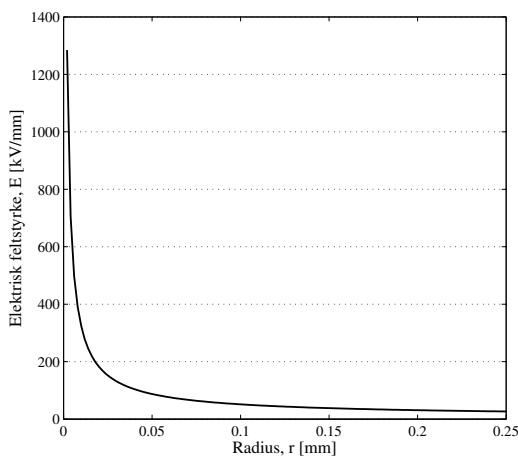
For eit nål-plan oppsett vil det elektriske feltet vere størst rundt nåla sin spiss. Mason [18] har utarbeida ein formel som gjev den maksimale feltstyrka som funksjon av spenning over isolasjon, U , radius til nål, r , og avstand mellom elektrodar, d .

$$E_{max} = \frac{2U}{r \ln(1 + \frac{4d}{r})} \quad (2.5)$$

Ut i frå denne likninga vil det elektriske feltet auke proporsjonalt med auka påtrykt spenning. Redusert avstand mellom nål og plan vil auke det elektriske feltet og ei auke av nåla sin radius vil redusere det.

Idet eit elektriske tre vert initiert ved nålespiss vil parameterane i likning 2.5 vere under endring. Det elektriske treet kan bli sett på som ei forlenging av nålespissen og vil gje nye verdiar for nålespissen sin radius, spenning over isolasjon og avstand frå nål til elektrode.

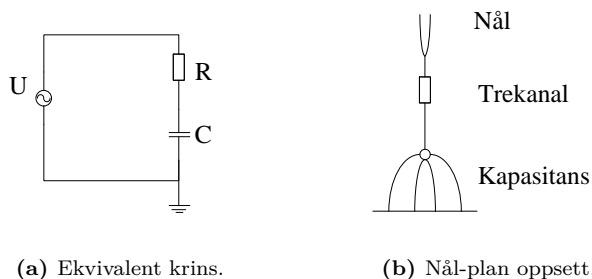
Figur 2.5 viser korleis den elektriske feltstyrka endrar seg som funksjon av nåla sin radius. Spenninga er sett til 10 kV og avstand mellom nål og plan er 1,2 mm. For elektrisk trevekst som får form som ei buske vil radiusen på treet bli relativ stor og det kan observerast at det elektriske feltet vil bli redusert. Med ei auke av radius frå til dømes 2 μm til 0,05 mm vil feltstyrka gå frå omlag 1300 kV/mm til 100 kV/mm.



Figur 2.5: Elektrisk feltstyrke ved nålespissen. $U = 10 \text{ kV}$ og $f = 50 \text{ Hz}$ $d = 1,2 \text{ mm}$.

Spenningsdeling over trestruktur

Ein enkel elektrisk modell av eit nål-plan oppsett er vist i figur 2.6a. Det er ei forenkling som bygger på Ohm si lov. Trekanalane er representert med ein motstand og isolasjonen mellom trespiss og plan blir ekvivalent som ein kapasitans i serie med tremotstanden.



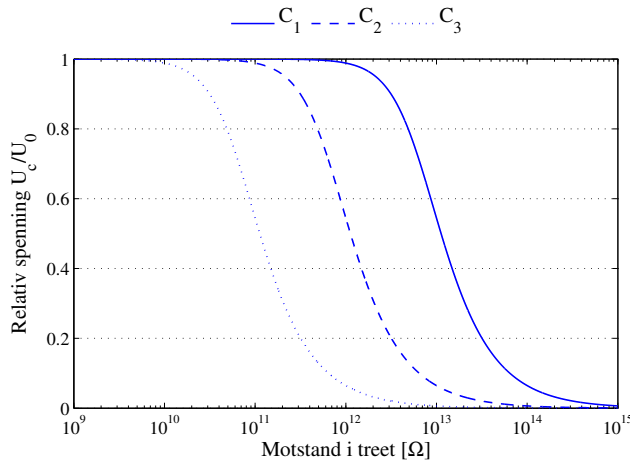
Figur 2.6: RC-modell av eit elektrisk tre som veks mot jordelektrode. Treet er ekvivalent som ein motstand og isolasjonen mellom trespiss og plan er ekvivalent som ein kapasitans.

Ved hjelp av spenningsdeling blir spenninga som ligg over isolasjonen mellom trespiss og plan funne. Likninga for å rekne ut denne spenninga er presentert i likning 2.6.

$$\left| \frac{U_c}{U_0} \right| = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega RC)^2}} \quad (2.6)$$

I likning 2.6 er U_c spenninga over isolasjonen mellom trespiss og plan, U_0 er den påtrykte spenninga, ω er frekvensen til påtrykt spenning, R er motstanden i det elektriske treet og C er kapasitansen til isolasjonen mellom trespiss og plan.

Trekanalane kan bli sett på som sylinderforma kanalar. Trekanalane si leieevne kjem av mengda karbon som ligg langs kanalane si overflate. Karbon blir frigjeve når isolasjonsmaterialet blir brote ned, som forklart i kapittel 2.3.2. For ein trekanal med liten radius samanlikna med lengda frå trespiss til jordelektrode vil det vere ei god tilnærming å bruke eigenkapasitansen til eit kule-plate gap som kapasitans for isolasjonen mellom trespiss og plan. Denne eigenkapasitansen er uavhengig av lengda mellom elektrodane, med ein tippadius på $2 \mu\text{m}$ er kapasitansen rekna til å vere $C_1 = 4,9 \cdot 10^{-4}$ pC [8].



Figur 2.7: Forholdet mellom spenning ved trespiss som funksjon av total resistans i trekanalane. U_0 har frekvensen 50 Hz og $C_1 = 4,9 \cdot 10^{-4}$ pC, $C_2 = 4,9 \cdot 10^{-3}$ pC og $C_3 = 4,9 \cdot 10^{-2}$ pC.

Ved ei endring i treet sin radius vil kapasitansen sin verdi bli endra. Likning 2.7 viser at kapasitansen er proporsjonal med radius.

$$C = 4\pi\epsilon_0\epsilon_r r \quad (2.7)$$

Ved hjelp av likning 2.6 kan det observerast korleis spenninga fordeler seg over isolasjonen mellom trespiss og elektrode som funksjon av treet sin motstand og isolasjonen sin kapasitans. Figur 2.7 illustrerer denne sammenheng.

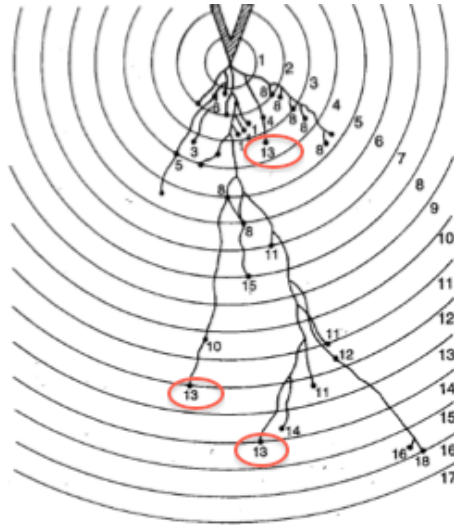
Karboninnhald i ein trestruktur aukar med auka nedbryting, det impliserer at leieevna i det elektriske treet aukar med tid. For elektriske tre med konstant kapasitans vil det føre til at U_c aukar med tida treet har vokse. Dette kan lesast utifrå figur 2.7. Blir det teke omsyn til treet sin radius vil kapasitansen sin verdi vere under endring, slik det er forklart i likning 2.7. Frå figur 2.7 der $C_1 < C_2 < C_3$ kan det observerast at ei auke i kapasitansen sin verdi vil redusere spenninga over isolasjonen mellom trespiss og elektrode ved konstant motstand i treet.

I kapittel 2.1 er det vist at PD er avhengig av påtrykt spenning, og PD-aktiviteten vil auke med auka spenning. Ut i frå dette og resultat i figur 2.7 kan det seiast at eit tre med god leieevne i trestrukturen vil oppleve ein større trevekst i lengderetning enn trevekst med dårlig leieevne. Ei auke i radius vil redusere spenninga U_c over isolasjonen mellom trespiss og elektrode. Dermed må eit elektrisk tre med auka radius oppnå ei betre leieevne i trestrukturen før det får like stor spenning U_c som eit tre med mindre radius.

2.3.2 Holrom i endring

Som følge av partielle utladingar i eit holrom vil materialet kring holrommet bli brote ned og innhaldet i holrommet og storleiken på det vil vere i endring. Frå Townsend [15] sin teori om utlading kan det forklarast at ei endring av holrommet vil endre utladinga sin aktivitet. Townsend har vist at spenninga som er kravd for at fyrste utlading skal finne stad er avhengig av storleik og form til holrom, type gass og gasstrykk [11].

I eit elektrisk tre kan gasstrykket variere i dei ulike delane av trestrukturen samtidig som karbon langs trekanalane vil føre til varierende elektrisk leieevne. Dette vil gje opphav til varierende PD-aktivitet i greinstrukturane og greiner vil vekse uavhengig av kvarandre. Dette er vist i figur 2.8 der greinene er nummerert etterkvart som dei har oppstått. Mellom anna kan det observerast at fleire greiner har oppstått ved same tid. Til dømes ved tidspunkt 13 kan det observerast trevekst tre stader i treet, både tidleg i trestrukturen og ytst i treet.



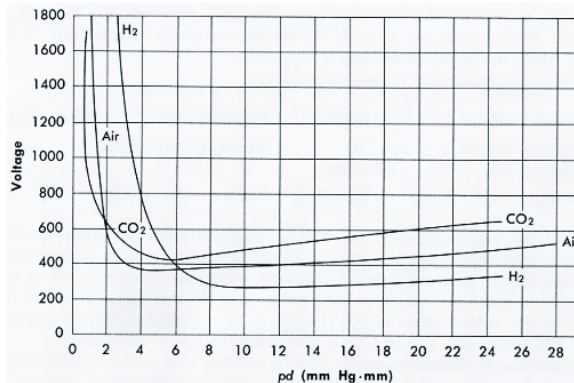
Figur 2.8: Illustrasjon over elektrisk trevekst. Greinene i trestrukturen er nummerert ut i frå tidspunktet dei vaks fram [15].

Gass

Trekanalane i eit elektrisk tre er bygd opp av holrom som er fylt med gass. Gassen som finnes i trekanalane har oppstått som følge av nedbryting av isolasjonsmaterialet og innhaldet i gassen er avhengig av kva isolasjonsmaterialet er bygd opp av. Ulike gassar vil ha ulik dielektrisk styrke, det vil påverke kor stor spenning som trengs for at PD skal opptre. Felles for polymerar er at dei består av karbon i grunnstammen med ulike sidegrupper av mellom anna karbon og hydrogen.

Etterkvart som nedbryting finn stad vil gasstrykket endre seg, både holrommet sin storleik og mengde gass vil bli endra. For holrom med eit uniformt elektrisk felt kom Paschen fram til at gjennomslagsspenninga er eit produkt av gasstrykket og avstand mellom elektrodene ved gitt temperatur [5]. Figur 2.9 viser denne samanhengen for fleire gassar, der gjennomslagsspenning er langs y-akse og langs x-aksen er produktet av gasstrykk, p , og avstand mellom elektrodane, d .

Ut i frå figur 2.9 kan det observerast at både ved å auke og minke produktet av gasstrykk og elektrodeavstand rundt grafen sitt minimum vil gje auka gjennomslagsspenning. Til venstre for grafen sitt minimum i figur 2.9 vil gasstrykket minke og eit elektron vil kollidere med færre partiklar på veg til elektroda. Dette gjev elektronet færre sjansar til å skape ioniserande kollisjonar. Til høgre for grafen sitt minimum vil gasstrykket auke og eit elektron vil kollidere med fleire partiklar på veg til elektroda. Elektronet får ein mindre avstand å akselerere over og det får mindre energi til å ionisere gassen.



Figur 2.9: Paschenkurve [4].

Material kring holrom

PD-aktivitet i holrom vil føre til nedbryting av materialet kring holrommet. Avhengig av kva materiale det er, og kor mykje energi som er kravd for å splitte bindingane i materialet, vil nedbryting skje med ulikt tempo. Ved nedbryting av polymermateriale vil i hovudsak karbon og hydrogen bli frigjeve.

Karbon vil legge seg langs holrommet si overflate, karbon er elektrisk leiande og vil påverke PD-aktiviteten. Mengda karbon langs veggene vil variere og kan dermed skape varierende spenningsforskjellar utover langs trestrukturen. Chen med fleire [3] påpeiker i ein rapport frå 2011 at dette vil vere avgjerande for type trestruktur som blir danna. Dette kan sjåast i samanheng med RC-modellen frå figur 2.3.1. Har treet god leiivevne vil spenninga i hovudsak ligge over isolasjonen mellom trespiss og plan. Eit tre med dårleg leiivevne vil ha størst spenning over trestrukturen.

Romladning

Romladningar er ladningar av ein polaritet som ikkje er kompensert av ein lik ladningskonsentrasjon med motsett polaritet på same stad. Ei slik ladning vil føre til eit lokalt forsterka felt gitt av Poisson si likning [5]:

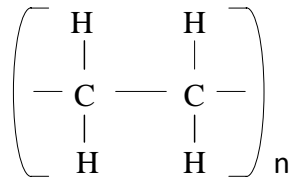
$$\Delta E = \frac{\rho_c}{\epsilon} \quad (2.8)$$

I likning 2.8 er ρ_c ladningstettleik og ϵ permittiviteten til materialet [5]. Romladning kan mellom anna komme av injisering av ladning frå elektrode, polarisering og ionisering av isolasjonen. Romladningar vil bli danna under elektrisk trevekst og vil gje lokale endringar i det elektriske feltet. Dette vil føre til varierende PD-aktivitet i trestrukturen.

2.4 Isolasjonsmateriale

Isolasjonsmateriale nytta i høgspenningskablar må kunne stå imot både elektriske-, mekaniske-, termiske- og kjemiske påkjenningar over lengre tid. Å rekne med ei levetid på 30 år er vanleg. I tillegg til desse ynskja er det krav om eit isolasjonsmateriale som er anvendbart i produksjon og installasjon, ikkje brennbart, økonomisk og miljøvennleg [11].

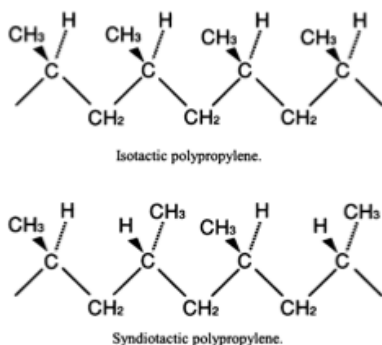
PEX har vore brukt som isolasjon i høgspenningskablar sidan 1960 åra. Då var det fyrst nytta på 12 kV og 24 kV nettnivå [10]. PEX isolasjon har utvikla seg og i 2004 var det anbefalt å bruke denne typen isolasjon for spenningsnivå opp til 420 kV på land og for sjøkablar var anbefalt spenningsnivå 132 kV [19]. PE har gode isolerande eigenskapar, men på grunn av lågt smeltepunkt kryssbindast materialet for å få naudsynte termiske eigenskapar. PE er bygd opp av molekylkjeder som vist i figur 2.10 [11].



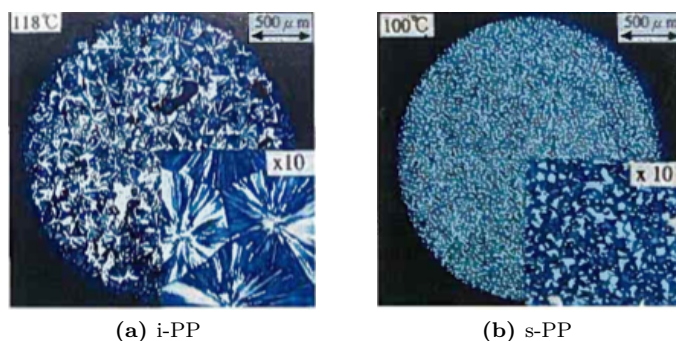
Figur 2.10: PE sin molekylstruktur.

Maksimal driftstemperatur for PEX er 90 °C. Auka spenningsbehov framover vil setje krav til høgare driftstemperatur i høgspenningskablar. Eit alternativ som isolasjonsmateriale, spesielt ved høge temperaturar, er polymeren polypropylen, PP. I motsetnad til PEX er PP ein termoplast, det vil sei at den kan bli smelta utan at den kjemiske strukturen blir broten ned [11]. PP har gode eigenskapar som låg permittivitet og dielektriske tap, høg smeltetemperatur og høg mekanisk og elektrisk gjennomslagsstyrke [12]. Det finnes fleire slag av PP, mellom anna i-PP og s-PP. Desse materiala blir i dag brukt som isolasjon i elektriske komponentar som til dømes kondensatorar. Utfordring med PP som isolasjon i høgspenningskablar er materialet sin høge smeltetemperatur og elastetsmodul, dette gjer materialet stivt og vanskeleg å handtere. På NTNU/SINTEF [7] og av forskarar i Japan [16] er PP undersøkt som mogleg arvtakar for PEX som kabelisolasjon.

Yoshino med fleire [14] frå Japan har undersøkt eigenskapane til s-PP samanlikna med i-PP sine, eit hovudfunn er materiala sin morfologi etter nedkjøling. Blir i-PP nedkjølt langsamt vil det bli danna sfærolittar i materialet, dette vil ikkje skje i like stor grad ved rask nedkjøling. For s-PP derimot vil det bli danna minimale sfærolittar uavhengig om nedkjølinga har skjedd raskt eller langsamt. Figur 2.12 visar denne ulikskapen [14]. Molekylstrukturu-



Figur 2.11: i-PP og s-PP sin molekylstruktur [16].



Figur 2.12: Danning av sfærolittar i PP [14].

ren til i-PP og s-PP er illustrert i figur 2.11. i-PP si metylgruppe er orientert same veg langs molekylkjeda medan metylgruppa til s-PP vekslar annankvar gong på kva retning den peikar. s-PP sin sikksakkstruktur hindrar molekylkjedene å binde seg saman til sfærolittar [14]. Ei ulempe med PP er at det er eit stivt og sprøtt materiale. Det ser ut til at materialet sin mekaniske styrke er avhengig av mengda sfærolittar. Bruddstyrka i i-PP blir redusert kraftig ved raskare nedkjøling [22]. s-PP sine eigenskapar som nemnt over gjer s-PP til eit meir fleksibelt materiale ved romtemperatur og enklare å ekstrudere enn i-PP. Smeltepunktet til s-PP er 130°C, som er noko lågare enn for i-PP med ein smeltetemperatur på 165°C [22]. Forskarane frå Japan har vore dei fyrste til å produsere kablar med s-PP som isolasjon for 600 V og 22 kV. Ut i frå elektriske testar utført på kablane er det konkludert med at s-PP kan egne seg som isolasjon i høgspenningskablar [16].

Eigenskapane til eit isolasjonsmateriale vil påverke elektrisk trevekst. Det er vist at eit materiale med mekaniske strekkkrefter vil auke elektrisk trevekst medan materiale med samantrykkande krefter vil redusere trevekst [12]. Frå

Tabell 2.1: Målte materialeigenskapar [12].

	s-PP	PEX
Påkjenning ved flytgrense [MPa]	18,2	12,9
Forlenging ved flytgrense[%]	45	79
Maksimal påkjenning [MPa]	25,5	22
Forlenging ved brot [%]	1300	950
Elasitetsmodul	1,8	0,8

forsøk gjort av Ildstad og Hølto [12] er ulike strekkspenningar målt i materiale av s-PP og PEX. Ei oppsummering av resultatata er lista opp i tabell 2.1, flytgrense er det punktet der det påførte strekket endrar materialet si påkjenning. Desse resultatata gjev forventning om at elektriske tre i s-PP vil vekse saktare enn elektriske tre i PEX. Grunnen til dette er at material med høg mekanisk styrke ved flytgrensa krev meir energi for at bindingane i materialet skal bli brote ned [8].

2.5 Resultat frå forskning på elektriske tre

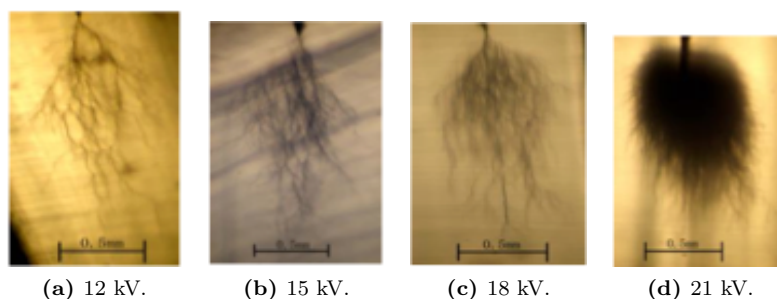
Kryssbunden polyetylen

Elektriske tre i PEX kan ta ulike form, avhengig av kva slag spenning og frekvens som er påtrykt. Det er utført mykje forskning kring elektriske tre sin vekst i PEX. Hovudtrekk viser at elektriske tre går frå å ha greinstruktur til buskstruktur ved auka påtrykt spenning [5] [24] [21]. Tre med buskstruktur har større forgreining og større greintettleik enn tre med greinstruktur. For PEX viser tidlegare studie [12] at gjennomslag skjer når fyrste grein når jordelektroda.

Vidare er det valt å sjå nærare på resultat frå Chen [24] si forskning. Bilete av hovudfunna han har kring ulike trestrukturar i PEX er presentert i figur 2.13. Han har nytta nåler av stål men med ein radius på $5 \pm 1 \mu\text{m}$. Avstanden mellom nålespiss og jordelektrode er frå 1,8 til 2,3 mm.

Chen trekk inn leieevna i kanalane som innverknad på korleis trestrukturen vert til [3]. I tabell 2.2 er ei oversikt over Chen sine resultat. Tida det tek før gjennomslag vert her omtala som TBD.

Chen har undersøkt trevekst ved spenningsnivå frå 9 kV til 27 kV. Generelt skil han mellom busk- og greinstruktur. Elektriske tre med greinstruktur får han ved 9 og 11 kV, medan buskstruktur blir danna ved spenning på 13 kV og opp til og med 27 kV. Ved den lågaste spenninga deler han greinstrukturen



Figur 2.13: Trestruktur i PEX ved ulike spenningsnivå [24].

Tabell 2.2: Resultat frå Chen si forskning på PEX [3].

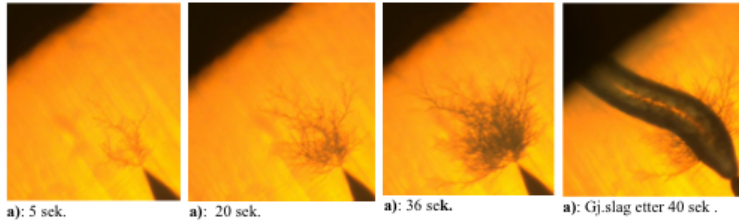
Spenning [kV]	Treet si form	Initieringstid [min]	TBD [min]	Vekstrate [$\mu\text{m}/\text{min}$]
9	Stagnert tre	44	>310	<3
	Greinstruktur	14	87	34
	Grein-pinestructur	26,5	152	16
11	Greinstruktur	2,4	27	93
13	Buskstruktur	2,6	63	35
15		0,7	139	14
18		0,7	119	17
23		0,6	13	178
27		0,5	5	1726

inn i 3 underkategoriar, *stagnert tre*, *greinstruktur* og *grein-pinestructur*. Tabell 2.2 viser korleis treet si form påverkar TBD ved auka spenning. For elektriske tre med greinstruktur vil TBD minke ved auka spenning, medan TBD for buskstruktur aukar for auka spenning fram til spenning på 15 kV. Etter dette vil TBD minke [3].

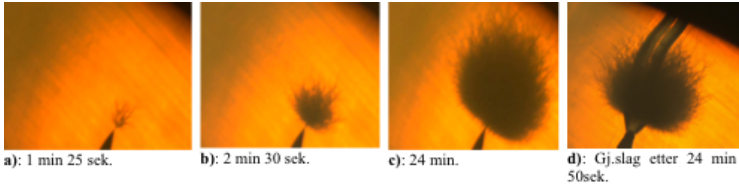
Det kan leggjast merke til at initieringstida for både grein- og buskstruktur minkar ved auka spenning.

Eit interessant funn er at det finnes motstridande resultat kring trestrukturen si form ved auka påtrykt spenning. Marit Ytterstad har i si masteroppgåve [23] frå NTNU i 2008 resultat som viser at det elektriske treet går frå buske- til greinstruktur ved auka spenning. Bilete frå hennar forsøk visast i figur 2.14.

Ytterstad har skore ut PEX-blokker frå ein 12 kV fordelingskabel i sine forsøk. Blokkene var $5 \times 5 \times 12 \text{ mm}^3$ store der det vart nytta stålnåler med radius



(a) Utviklinga av greinstruktur ved 12 kV.



(b) Utviklinga av buskstruktur ved 6,25 kV.

Figur 2.14: Resultat frå Ytterstad sine forsøk av testobjekt av PEX [23].

på 22 μm . Avstand mellom nålespiss og jordelektrode var $1,00 \pm 001\text{mm}$.

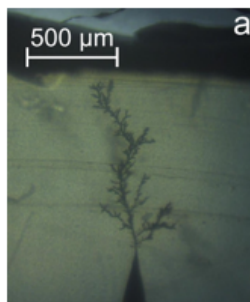
Ytterstad forklarar sitt resultat med at ved lågare spenning får treet lenger tid til å vekse i breidda [23].

Syndiotaktisk polypropylen

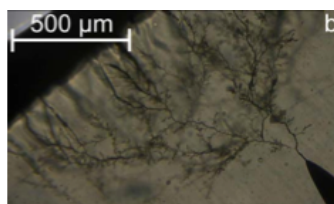
Elektriske tre si utvikling blir tradisjonelt delt inn i tre periodar: initiering, propagering og gjennomslag. Ved studie av s-PP som isolasjonsmateriale er denne inndeling ikkje lenger tilfredsstillande. Forsking utført av Hølto [7] viser at i s-PP vil det elektriske treet kunne nå jordelektroda utan umiddelbart gjennomslag. Treet vil då kunne utvikle fleire greiner til jord, som vist i figur 2.15b. Det er då gunstig å dele inn i to nye periodar: tida det elektriske treet brukar til jordelektroda, TG, og tida før gjennomslag, TBD. Tida frå TG til TBD kan variere mellom alt frå få minutt til timar avhengig av spenning og frekvens. I nokre tilfelle vil TG og TBD skje på same tidspunkt [7]. Bilete av typisk trevekst i s-PP er vist i figur 2.15.

Testobjekta som vart brukt i Hølto sine forsøk var $20 \times 10 \times 2$ mm store. Stålnålne vart sett inn i isolasjonsmaterialet under støyping av objekta, nålene hadde ein radius $4 \pm 1\mu\text{m}$. Avstanden frå nålespiss til jord var $1,05 \text{ mm} \pm 0,15 \text{ mm}$.

Resultat frå Hølto [6] sine forsøk viser at fram til treet når jord aukar lengda fortare enn breidda og veksten er relativt jamn. Dei siste sekunda før treet når jord er det ei auke i vekstraten. Deretter ber breidda til treet preg av å vekse stegvis, nye parallelle greiner veks mot jord. Tid til jord og tid



(a) Tre med enkelt grein til jord.



(b) Tre med fleire greiner til jord før gjennomslag.

Figur 2.15: Trevekst i s-PP [7].

til gjennomslag minka i s-PP ved auka spenning. I PEX isolasjon vil både elektriske tre med buskform og greinform eller blanding av desse oppstå [24]. I forsøka til Hølto viser derimot resultat at elektriske tre i s-PP kun dannar tre med greinform ved desse spenningane [6].

Eit spesielt kjenneteikn ved avslutninga på trekanalane er at dei vert tilsynelatande tjukkare idet dei når jordelektroda. Ved undersøking av tverrsnittet til desse områda vert det funne at den krystallinske strukturen er endra. Dette tyder på at materialet her har vorte utsett for høgare temperatur enn smeltetemperaturen til isolasjonsmaterialet. Auka temperatur i isolasjonen kan bli knytt til PD-aktivitet [6].

Kapittel 3

Metode

For å undersøke elektrisk trevekst trengs eit testobjekt der forholda for trevekst er tilstades. Elektriske tre oppstår i områder med forsterka elektrisk felt. For å oppnå slike forsterka felt vert ofte nåler brukt som elektrode. Som testobjekt kan korte lengder av ferdige kablar nyttast eller eigne objekt av isolasjonsmaterialet kan produserast. Fordelen med ferdige kablar er at desse har gått gjennom den faktiske produksjonsprosessen som er naudsynt for heile kabellengder, og har vore utsett for dei påkjenningar som oppstår ved normal kabelproduksjon. Som jordelektrode kan halvleiaren i kabelen nyttast. Ei utfordring ved å bruke kablar er at det er vanskeleg å setje inn ei nål i polymeren. Polymeren er kald og stiv og nåla som blir pressa inn vil skape mekaniske spenningar i materialet. Det kan og vere vanskeleg å få nåla til å halde seg inne i materialet og i den posisjon som er ynskjeleg. Ved produksjon av eigne testobjekt vil dei mekaniske spenningane som blir skapt av nåla bli redusert sidan nåla støypast inn samtidig som materialet blir støypt. Nåla blir då plassert i ei form som sørgjer for at den held seg i ynskt posisjon ved nedkjøling. Begge desse metodane har vore nytta i forsøk på NTNU [23] [7].

I denne oppgåva er det nytta eigenproduserte testobjekt. Når testobjekta er ferdigstilt trengs det ein elektrisk krets som gjev ynskja spenning og frekvens på testobjektet. Elektriske tre er kun nokon få millimeter store, for å studere desse er det nødvendig med mikroskop. Det er og interessant å kunne ta bilete medan treet veks samstundes som partielle utladingar i testobjektet blir målt. Tilsvarande eksperiment har vorte gjennomført på NTNU tidlegare. Det har vore av stor hjelp i utføringa av det praktiske arbeidet [7].

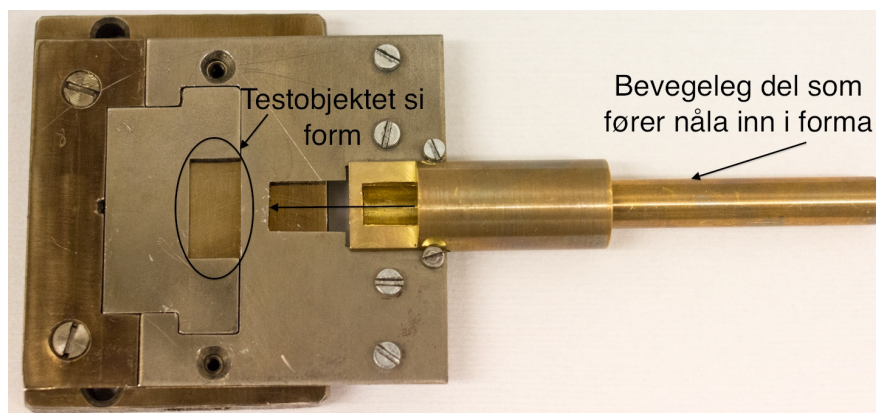
Kva slags utsyr som er tilgjengeleg på laboratoriet og kor lang tid som er till disposisjon set grenser for kva som kan bli undersøkt. Ved undersøking av elektriske tre er det fleire parameter som er interessante å sjå nærare på. I forsøka vil det bli brukt et nål-plan oppsett for å studere den elektriske treveksten. Med bakgrunn i kva som er gjort tidlegare på NTNU er det

valt å bruke same produksjonsformer for testobjekta som i tidlegare forsøk. Dette er både tidsbesparande og det gjev moglegheit for samanlikning. Det er og brukt like stålnåler og lengde mellom nålespiss og jordelektrode som tidlegare.

Hovudfokuset i denne oppgåva er å undersøke elektriske tre si utvikling under ulike spenningspåtrykk og i to ulike isolasjonsmaterial. Det vert brukt ein transformator som gjev frekvens på 50 Hz, dermed vil denne parameteren bli halde konstant gjennom alle forsøk.

3.1 Produksjon av testobjekt

Produksjonen av testobjekt føregjekk på plastlaboratoriet til NTNU/SINTEF. Testobjekta vart laga i former som er produsert på NTNU og nytta i slike forsøk tidlegare, korleis ei slik form ser ut er vist i figur 3.1. Sjølve testobjektet var ikkje større enn 20x10x2 mm og arbeidet med å lage desse innebar presisjon og tolmod. Testobjekta gjekk gjennom mange delprosessar før dei vart ferdigstilt.



Figur 3.1: Form som vert brukt til å lage testobjekt.

Forsøka har vorte utført med to ulike isolasjonsmateriale. Syndiotaktisk polypropylene, s-PP, (Finaplas 1471, Total) med smeltepunkt 130 °C og kryssbunden polyetylen, PEX, (LE4201). Isolasjonsmaterialet har vorte ekstrudert på NTNU. For å få den ynskja storleiken på testobjektet har det vorte utarbeida former som det ekstruderte materialet vart smelta inn i. I kvart objekt er det brukt 0,3 gram isolasjonsmaterial.

Støyping av PEX og s-PP skjer ved ulik temperatur og tid, men denne prosessen vart for begge utført i ei presse, *Genesis Wabash*, som kan variere trykk og temperatur. Denne maskina står i plastlaboratoriet på SINTEF og

er avbildet i figur 3.2. Innstillinga for dei to ulike prosedyrane er lista opp i tabell 3.1.



Figur 3.2: Pressemaskin, *Genesis Wabash*.

Etter at smeltinga var ferdig vart testobjekta nedkjølt. Til dette vart det brukt vassavkjøling, ein funksjon som er innebygd i pressemaskina. Det vart prøvd å halde ei avkjøling som gav ei minke i temperaturen på 15-20 °C per minutt. Temperaturen vart målt ved hjelp av temperaturloggar og termoelement festa til formene.

Under nedkjøling av testobjektet oppstår det mekaniske spenningar i PEX rundt nål og elektrode. Dette er på grunn av at stål blir nedkjølt fortare enn PEX, og isolasjonen som ligg nærast nåla vil då bli nedkjølt fortare enn den omkringliggjande isolasjonen. Testobjekta vart undersøkt med mikroskop og kryssa polariseringsfilter for å studere korleis dei mekaniske kreftene opptrer i isolasjonen. For å redusere dei mekaniske påkjenningane i PEX vart testobjekta sett i varmeskåp over 2 døgn med ein temperatur på 90 °C.

Det er viktig med like nåler for kvart testobjekt slik at det skal vere mogleg å samanlikne resultatata. I testobjekta vart det nytta nåler med ein radius på 2 μm på spissen og ein avstand mellom nålespiss og elektrode på

Tabell 3.1: Innstilling av presse.

	s-PP		PEX	
	Periode 1	Periode 2	Periode 1	Periode 2
Trykk [bar]	3	10	3	10
Tid [min]	7	45	8	2
Temperatur [°C]	117	170	180	180

1,05 mm \pm 0,15 mm, dette vart målt i mikroskop. Nåla vart skyvd inn i isolasjonsmaterialet når isolasjonen til testobjektet var smelta, like før overgangen frå periode 1 til periode 2 i samsvar med tabell 3.1.

Det var viktig at det ikkje danna seg holrom rundt nålspissen eller at det la seg forureining på nåla eller i gapet mellom nålespiss og jordelektrode som kunne lage lokale feltforsterkingar.

Når prøveobjektet vart avkjølt og skulle takast ut av forma, måtte den handsamast varsamt. Ofte var ein del av isolasjonsmaterialet smelta og pressa ut av forma, det førte til at testobjektet sat fast. Det var ein fordel å ein gong iblant setje forma inn med sleppmiddel. Då gjekk denne delen av prosessen lettare, med mindre sannsyn for å øydeleggje testobjektet.

Jordelektroda på testobjektet var av sølvepoxy. Til jordelektroda vart eit lite stykke med aluminiumsfolie festa, det størkna inn i epoxyen. Aluminiumsfolien gjorde det mogleg å kople på jordingsklemme til testobjektet, dette er vist i figur 3.5b.

Under heile produksjonsprosessen av prøveobjekta var det særskilt viktig å halde god reinsemd på arbeidsplassen og med utstyret. Forureining i testobjektet kan påverke elektrisk trevekst. For å hindre forureining har produksjonen av testobjekt gått føre seg på ein *flowbenk* og isopropanol har vorte brukt til reingjering av benk og utstyr.

3.2 Oppsett av krins for å detektere PD og elektrisk trevekst

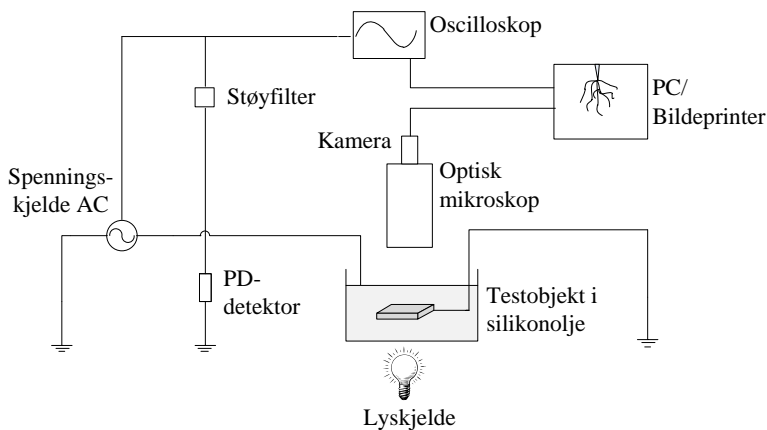
Oppsett av krins og kjøring av eksperiment med påtrykt spenning vart gjort i celledelt hall i kjellaren på NTNU. Bilete av oppsettet som vart brukt er vist i figur 3.3. Krinsen er skissert i figur 3.4. Oppsettet er relativt enkelt og nyttar elektrisk deteksjon av PD som forklart i kapittel 2.1.

Hovudkomponentane i krinsen var ein styrepult, 50 Hz PD fri transformator,



Figur 3.3: Oppsett av krins i høgspenningslaboratorie på NTNU.

109 pC kondensator, digitalt oscilloskop og eit oppsett for testobjektet med mikroskop. Ved måling av PD vart det i hovudsak nytta eit registreringssystem tilknytta eit oscilloscop, der PD-signala si mengde og storleik kunne bli lest grafisk av skjermbiletet. Vel å omtale dette systemet som PD-system1 vidare i oppgåva. Omicron PD-målesystem er eit meir detaljert system og gav målte data ut som talverdiar. Dette er eit dyrt målesystem, SINTEF har ei begrensa mengde til utlån for studentar og tilsette. Det var derfor kun tilgjengeleg for meg over ei kortare periode. Vel å omtale dette systemet som PD-system2.



Figur 3.4: Skisse over oppsett av krins for elektriske tre og partielle utladningar.

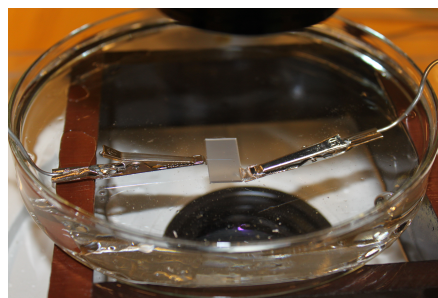
Ved laboratoriearbeid er det viktig med god sikkerheit. For at krinsen kunne bli brukt måtte den gjennom ein kontroll for å bli godkjent. Det var spesielt

viktig at alle koplingane til jord var utført skikkeleg. Sjølve oppsettet var inne i ei avsperra celle. Dette for å hindre at menneske kunne komme i kontakt med spenningssette delar medan forsøket pågjekk. Styrepulten sto utanfor cella og det var ikkje mogleg å setje på spenning utan at cella var lukka. Etter kvart forsøk, når cella vart opna, vart ein jordstav kopla til krinsen for å sikre at all straum gjekk til jord.

Testobjektet vart lagt i ei skål fylt med silikonolja. Silikonolja hadde ein permittivitet omlag lik permittiviteten til isolasjonsmaterialet, dette reduserte sjansen for overflateutladningar. Silikonolja hindra og refleksjon av lys slik at bilete av testobjektet var betre. Testobjektet var kopla inn i kretsen med metallklemmer, då kan det enkelt skiftast ut ved gjennomslag, dette er vist i figur 3.5b .



(a) Oppsett av testobjekt med Keyence mikroskop.



(b) Oppsett av testobjektet i skål med silikonolja.

Figur 3.5: Mikroskop.

For å redusere støysignal vart måleinstrument og datamaskin kopla via ein skilletransformator til straumuttaket. Dette fordi jordpotensialet i straumkrinsen til stikkontaktane kan vere ulikt jordpotensialet til kretsen. Elles vart det prøvd å unngå skarpe kantar i oppsettet som kunne gje korona.

3.3 Innstilling av måleutstyr

Som måleinstrument vart eit Yokogawa oscilloskop (DLM2054) nytta. To av kanalane vart nytta, den eine kanalen tok inn signal frå PD-detektoren og den andre målte den påsette spenninga. Ved analyse er det føremålstenleg at den positive halvperioda er på positiv akse og negativ halvperiode er på negativ akse på oscilloskopet. For å sikre seg dette vart eit enkelt luftgap kopla til krinsen. Ved påsetjing av spenning vart då typiske Trichel-pulsar attkjend ved negativ halvperiode [11].

To ulike digitale mikroskop vart nytta under forsøka. Dette var fordi eit anna prosjekt på NTNU/SINTEF hadde bruk for mikroskopet eg starta å bruke. For arbeidet i denne masteroppgåva hadde ikkje typen mikroskop noko å seie for resultatane, men det gav litt ulik måte å behandle data på.

Det fyrste mikroskopet, NIKON AZ100, var kopla opp mot ei datamaskin der bilete vart lagra ved hjelp av programmet NIS Elements BR. Programmet NIS Elements BR har funksjonen TIMELAPSE som tek bilete automatisk utifrå ønska intervall og over ønska tidsperiode. Bileta vart lagra i ei felles ND2 fil. Det andre mikroskopet, Keyence VHX-500K, hadde eit eige instrument som bilete vart lagra på. Den elektriske treveksten vart filma og det kunne takast bilete i ynskt tidsintervall. Begge instrumenta hadde verktøy for å måle avstandar og areal på bilete i etterkant, noko som var til god hjelp når treveksten skulle bli undersøkt, som vist i figur 3.7.

Ved måling av PD vart det som forklart i kapittel 3.2 tatt i bruk to ulike målesystem. PD-system1 gav signal inn på oscilloskopet og ved hjelp av labview kunne skjermbilete frå oscilloskopet bli lagra som fil på datamaskin. Ved måling av PD-aktivitet vart oscilloskopet stilt inn slik at det målte storleiken til utladingane på y-aksen og mengda signal med fargekode. For at signala skulle vere tydelege å lese av vart måledataa akkumulert over ei periode på 10 sekund. Oscillopet hadde ikkje minne til å akkumulere over eit lengre tidsintervall. For å få med mest mogleg av PD-aktiviteten men samtidig avgrense antall bilete vart det take skjermbilete kvart tiande sekund i labVIEW. PD-system2 lagra alle måledata i eit eige dataprogram. Med dette målesystemet var det mogleg å få informasjon om mengde utladingar, den største utladinga sin storleik og ein gjennomsnittsverdi for utladingane sin storleik. Informasjonen vart gjeve som talverdiar, i tillegg gav programmet eit grafisk skjermbilete som viste når utladingane opptrådde i forhold til den påsette spenning. Dette systemet kunne ikkje ta bilete fortare enn kvart 15. sekund og vart stilt inn til å gjere det.

Målesystem for partielle utladingar blir påverka av ytre støykjelder, det var viktig å skjerme for slik pulserande støy. Mellom anna kunne korona frå leiar i luft, interne utladingar i målekrinsen eller støy frå nærliggande kjelder føre til forstyrringar på resultatet [17]. For å stadfeste sensitiviteten til målekrinsen er det naudsynt å undersøke storleiken på støysignalet. Støysignalet vert målt utan spenning på krinsen.

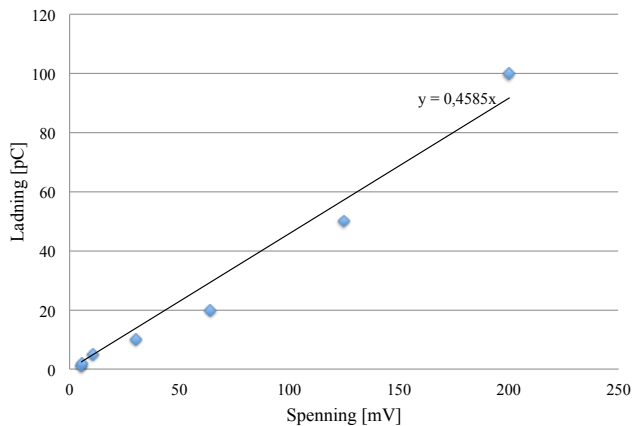
3.4 Kalibrering

Ved måling av PD var det naudsynt å kalibrere målesystemet for å etablere forholdet mellom avleste verdier frå målesystemet og dei faktiske målesignala.

PD-system2 kunne kalibrerast kun ved å tilføre ei kjent ladning og deretter trykke `compute` i programmet. Då vart systemet justert etter den kjente ladninga. Dette vart og gjort for spenninga.

PD-system1 registrerte PD-signal som spenningsfall og gav ut data om utladningane i volt. For å bestemme samanhengen mellom spenninga som vart avlese og kor stor utladninga var vart systemet kalibrert. Under kalibreringa vart det injisert både negativ og positiv ladning, vedlegg A. Ved deteksjon av PD i målekrinsen kunne det ikkje skiljast mellom negative og positive utladningar. Brukte derfor ein gjennomsnittsverdi for positiv og negativ ladning, resultatet er presentert i figur 3.6. Fann deretter ein tilnærma funksjon ved hjelp av lineær regresjon, likning 3.1. Der ladninga q er i picocoloumb og spenning U er i millivolt.

$$q = 0,4585U \quad (3.1)$$



Figur 3.6: Kalibrering av målekrins.

3.5 Analyse

Denne masteroppgåva har hatt som oppgåve å studere elektriske tre sin vekst i korrelasjon med partielle utladingar. Mykje data kan bli henta ut ved studie av elektriske tre. Det som er fokusert på i dette prosjektet vil bli forklart vidare i dette kapittelet og korleis informasjonen er henta ut vil bli vist.

Resultat frå denne masteroppgåva vil ikkje inkludere dei elektriske trea si initieringstid. Under initieringa spelar nåla sin geometri ein viktig rolle for kor stor den lokale elektriske feltstyrka er rundt nålespiss. Ved preparering av testobjekta har det blitt brukt nåler med ein spissradius på $2\ \mu\text{m}$. Denne radiusen har blitt målt med eit mikroskop, og avvik frå denne verdien kan ha oppstått. Ut i frå Mason [18] sin formel kan den elektriske feltstyrka rundt nålespiss reknast ut, som vist i kapittel 2.3.1. Ved ei endring av nålespissen sin radius frå $1,5\ \mu\text{m}$ til $2,5\ \mu\text{m}$, ved $10\ \text{kV}$ og ein avstand frå nål til plan på $1\ \text{mm}$, vil den elektriske feltstyrka minke frå $1690\ \text{kV/mm}$ til $1080\ \text{kV/mm}$. Dette vil gje skilnadar i dei elektriske trea sine initieringstider som ikkje direkte kan relaterast til type isolasjonsmateriale eller spenninga sin storleik.

3.5.1 Elektriske tre

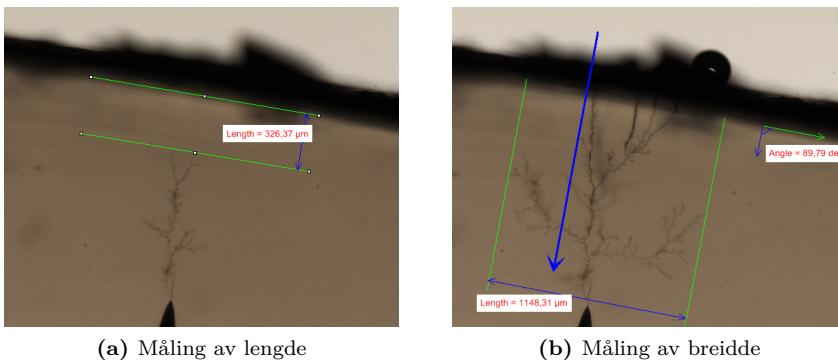


Figure 3.7: Målefunksjon i NIS elements BR

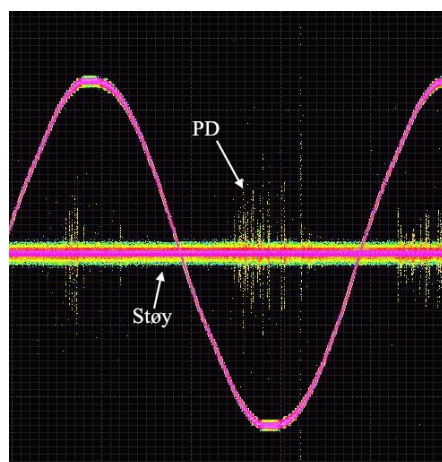
Vekstfarten til elektriske tre er ein nyttig måte å karakterisere elektrisk trevekst på. Både breidde og lengde vart målt som funksjon av tid, målemetoden er presentert i figur 3.7. Ved måling av treet si lengde vart lengda frå treet si lengste grein til jordelektroda målt, som vist i figur 3.7a. Breidda vart målt ved å finne treet sine ytterpunkt i forhold til linjer parallelle med nåla, målemetoden er vist figur 3.7b. Det vart teke bilete av treveksten kvart 10. sekund for PD-system1 og kvart 15. sekund for PD-system2. For å avgrense arbeidsmengda ved analysearbeidet vart det kun teke ut måledata kvart 30. sekund. Då vart alle bileta dei siste 30 sekunda undersøkt. Dette viste seg å

vere tilstrekkeleg for å gje eit bilete av korleis breidda utvikla seg i forhold til lengda.

3.5.2 Partiell utlading

Ved analyse av partielle utladningar var to ulike målesystem nytta som nemnt i delkapittel 3.3.

PD-system1 gav måledata grafisk, og PD-aktiviteten sin storleik måtte lesast frå skjermbiletet. I denne oppgåva vart det valt å lese av den maksimale PD-amplituden og bruke denne verdien til å karakterisere PD-aktiviteten i testobjektet. Verdier vart lese av kvart 30. sekund, dermed vil verdien som blir registrert vere den maksimale utladinga dei siste 30 sekunda. PD-aktivitet blir vist som punkt i den grafiske framstillinga. Dette vil gje eit inntrykk av kor stor mengde PD som opptrer, men vil ikkje gje noko eksakt tal på kor mange utladningar som faktisk finn stad. I den grafiske framstillinga vert PD-aktivitet referert til i forhold til den påtrykte spenninga. Eit typisk skjermbilete frå desse målingane er vist i figur 3.8.

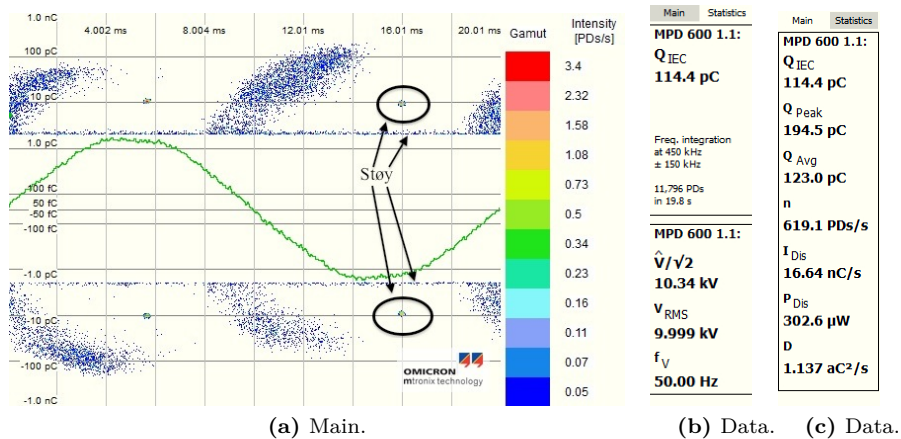


Figur 3.8: PD-aktivitet i faseplott på oscilloskop, påtrykt spenning $U_{eff} = 10$ kV.

Bilete frå oscilloskopet vart lagra ved hjelp av programmet labVIEW som colorpictures. Antall bilete vart relativt mange og det var ein fordel å kunne bla gjennom bileta fort. Det gjekk ikkje med colorpictures bilete, men det kunne bli gjort med jpg bilder i preview. Eit triks var derfor å bruke programmet *Lupas rename*. Då kunne det enkelt skiftast filtype på fleire filer samtidig. Det har vore tidssparande å endre filtype frå colorpic til jpg.

PD-system2 gav fleire og meir presise data enn PD-system1. Det registrerte informasjon om kvar einaste utlading. Informasjonen som kunne hentast

direkte ut frå dataprogrammet til målesystemet er vist i figur 3.9.



Figur 3.9: PD-aktivitet i faseplott frå PD-system2.

Data frå målingane kunne bli eksportert til Matlab for vidare handsaming. Data som kunne bli eksportert innehaltd informasjon om antall utladningar, storleik på utladningane og utladningane si tilknytning til den påtrykte spenninga si fase. I Matlab vart det utarbeida eit script som behandla desse verdiane, koda finnes som vedlegg D. I motsetnad til PD-system1 var arbeidsmengda her den same uansett i kor store intervall målingane vart avlesne, i scriptet kunne det veljast lengde på intervallet før kvar gjennomkjøring. Innanfor kvart intervall vart største ladning, gjennomsnittsladning og antall utladningar registrert og lagra. Informasjonen henta ut ved hjelp av matlabsriptet er presentert grafisk. Ved samanlikning med resultat frå PD-system1 vart intervalla sett til 30 sekund her og.

Støy

På høgspenningslaboratoriet på NTNU var det fleire forsøk som pågjekk samtidig, dette var ei utfordring for PD-målingar som set krav til sensitivitet. Etter å ha bytta arbeidsplass ei gong på grunn av for mykje støy, gav målingane tilfredsstellande resultat, sjå vedlegg A . Støynivået vart målt til 4,6 mV for PD-system1 noko som svarar til ei ladning på 2,1 pC ut i frå likning 3.1. Det er eit tydeleg støybeltet kring x-aksen i figur 3.8.

Under forsøk med PD-system2 har det vore mykje støysignal. I dataprogrammet kunne det setjast ein terskel for kor store støysignal det var, då vart alle signal under dette nivået utelukka under PD-registrering. I målingane har denne verdien vore sett til 2 pC ut i frå kva støynivået i PD-system1 var. I figur 3.9 visast det at det fortsatt var støysignal, det var eit tydeleg belte over 2 pC. I tillegg har det i målingane frå PD-system2 vist seg å vere ei

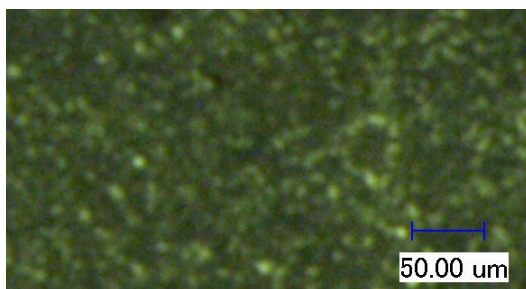
PD-kjelde som opptrer ved maksimal og minimal spenning. Desse signala er vist i figur 3.9. Storleiken på desse utladningane har vore mellom 10 pC og 25 pC ved alle forsøk. Plasseringa av PD-aktivitet i forhold til den påsette spenninga tyda på at det var korona utladningar. Dette kan kome av spisse overgangar i krinsen som førte til utladningar i lufta [11] [17].

3.6 Undersøking av isolasjonen sin morfologi

Sfærolittar i eit isolasjonsmateriale vil redusere den mekaniske og elektriske styrka til materialet [22]. I s-PP er det vist at danninga av sfærolittar er liten, dette er forklart i kapittel 2.4. For å stadfeste at dette stemmer for testobjekta som er produsert er morfologien deira undersøkt i mikroskop.

Ved undersøking av isolasjonsmaterialet vart ein kniv-mikrotom nytta til å dele testobjektet i fine skiver med tjukkelse på 30 μm . Morfologien vart studert i digitalt mikroskop med kryssa polariseringsfilter.

Kryssing av polariseringsfilter fungerer slik at det kan detektere krystallinske strukturar. Eit polariseringsfilter har ein polariseringsakse, lys som er polarisert langs den same aksen slepp gjennom filteret. Lys polarisert 90 ° på aksen slepp derimot ikkje gjennom. Blir då to slike filter lagt over kvarandre med 90 ° kryssing vil i teorien ikkje noko lys sleppe igjennom. Dette kan brukast for å detektere krystallinske område i materialet. Det er fordi krystallinsk materiale bryt lyset sin strålingsvinkel. Ligg då isolasjonsmaterialet mellom dei to filtera vil kun lys frå krystallinske område sleppe ut.



Figur 3.10: Morfologien til testobjekt av s-PP etter støyning.

Kapittel 4

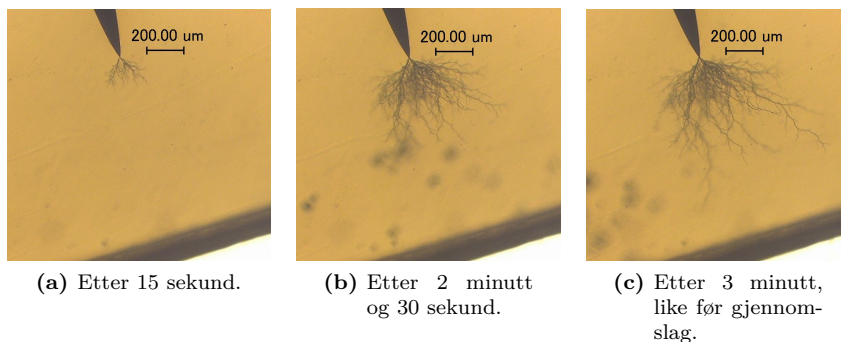
Resultat

4.1 Elektriske tre sin utsjånad

Elektriske tre i PEX og s-PP har ulik utsjånad. Skilnadane mellom materiala blir presentert i dette delkapittelet.

4.1.1 Kryssbunden polyetylen

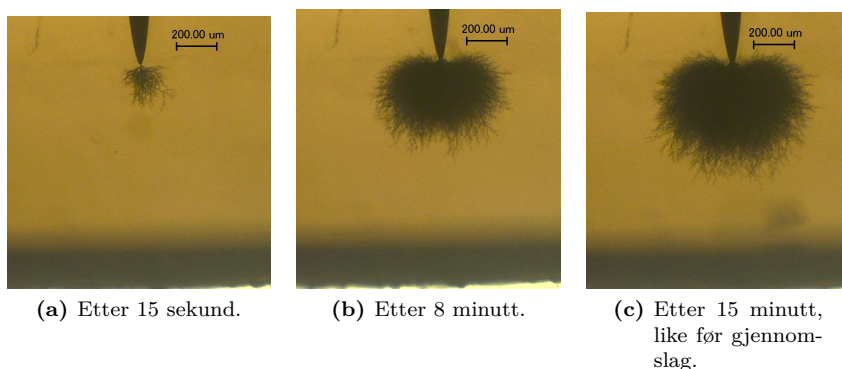
Elektriske tre i PEX opptrer både som tre med busk- og greinvekst. Ved låge spenningar, spenning under 10 kV, har treveksten greinstruktur. Ved samanlikning av greinstrukturen i PEX og s-PP kan det observerast at dei elektriske trea i PEX har større forgreining nær nålespissen. Bilete av greinstruktur i s-PP og PEX er vist i høvesvis figur 4.1 og 4.4.



Figur 4.1: Utvikling av greinstruktur i PEX ved 8 kV.

Ved overgang frå 8 kV til 10 kV tek det elektriske treet form som ein busk.

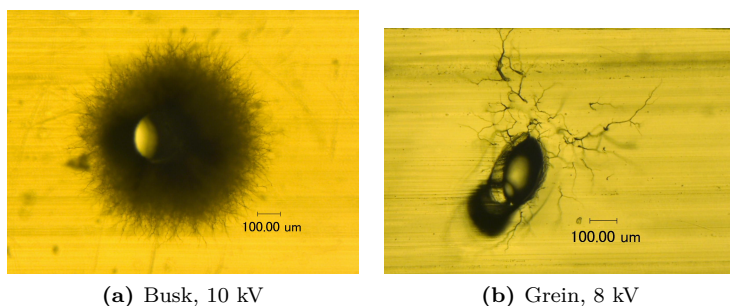
Greintettleiken i busktr e er stor med mange forgreiningar som startar n er n alespiss. Greinene veks veldig tett og trestrukturen kan sj a ut som ein tjukk samanhengande busk. Figur 4.1 viser utviklinga til eit slikt tre i PEX ved 12 kV.



Figur 4.2: Utvikling av buskstruktur i PEX ved 12 kV.

Elektriske tre i PEX f ar gjennomslag idet fyrste grein n ar jordelektroda. Breidda til det elektriske treet aukar ved auka spenning. Resultat som viser den totale breidda til treet som funksjon av spenning er presentert i figur 4.8. Den totale breidda til treet aukar i gjennomsnitt fr a 0,91 gonger treet si totale lengde ved 8 kV til 1,13 gonger treet si totale lengde ved 12 kV.

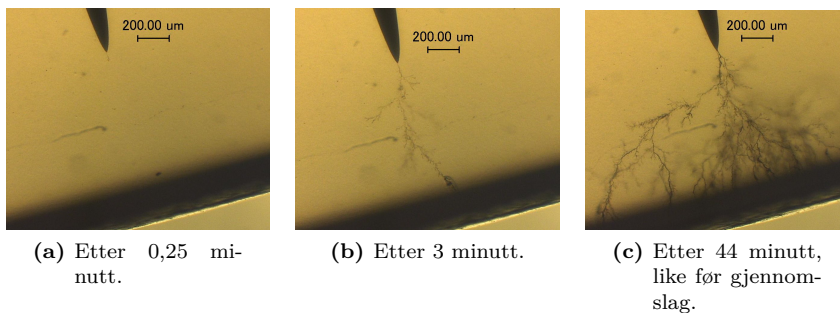
Breidda til treet utvidast i alle retningar. Elektriske tre med form som ein busk veks tiln erma symmetrisk som ein ball. Tverrsnitt av grein- og buskstruktur av elektriske tre i PEX er presentert i figur 4.3 Bilete av tverrsnitt er gjort av pr over som har vorte utsett for gjennomslag. Gjennomslagskanalen kan tydleg observerast i bileta.



Figur 4.3: Tverrsnittet av elektriske tre i PEX

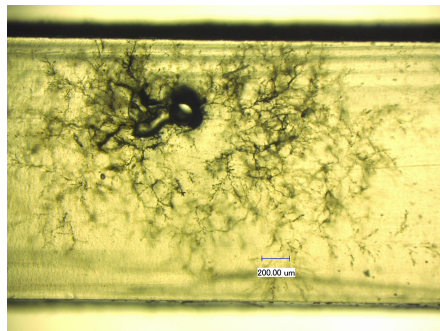
4.1.2 Syndiotaktisk polypropylen

Elektriske tre i s-PP har greinstruktur ved både 8 kV, 10 kV og 12 kV. Treet har få forgreiningar før det når jordelektrode. Typisk bilete av eit slikt tre idet det når jordelektrode er vist i figur 4.4a. Det spesielle med elektrisk trevekst i s-PP er at det ikkje nødvendigvis blir gjennomslag når fyrste grein når jord. I staden for at det blir gjennomslag vil treet fortsette å vekse, nye parallelle greiner veks til jord og treet vil auke i breidda, som vist i figur 4.4c. Treet si totale breidde like før gjennomslag minkar ved auka spenning, som presentert i figur 4.8. Den totale breidda minkar i gjennomsnitt frå 2,25 gonger den totale lengda ved 8 kV til 1,25 gonger den totale lengda ved 12 kV.



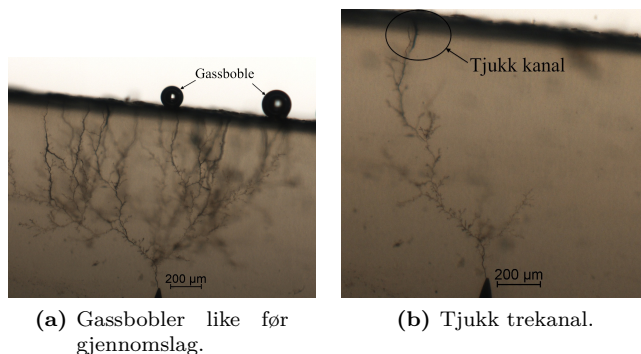
Figur 4.4: Utvikling av greinstruktur i s-PP ved 8 kV. Tida startar å telle idet initieringa er over.

Treet veks over heile djubda til testobjektet, dette kjem fram i bilete av trestrukturen sitt tverrsnitt i figur 4.5. Bilete av tverrsnittet er gjort av ei prøve som har vorte utsett for gjennomslag. Gjennomslagskanalen kan tydeleg observerast i biletet.



Figur 4.5: Tverrsnitt av trestruktur i s-PP etter gjennomslag. Tverrsnittet er 0,6mm frå jordelektroda.

Den delen av trekanalen som er i tilknytning til jordelektroda får tilsynelatende tjukkare kanal i det den har kontakt med jordelektroda. Bilete av slike tregreiner er vist i figur 4.6b. Når tregreiner møter jordelektroda kan det observerast i forsøka at gass frå trestrukturen blir blåst ut gjennom elektrodeveggen. Dette skjer ofte idet trekanalen får kontakt med elektrodeveggen. Gassboblene visast godt sidan det er silikonolje omkring testobjektet, som vist i figur 4.6a. Gassutblåsing fører til at trykket inne i trekanalane blir redusert og det skjer ofte like før gjennomslag.

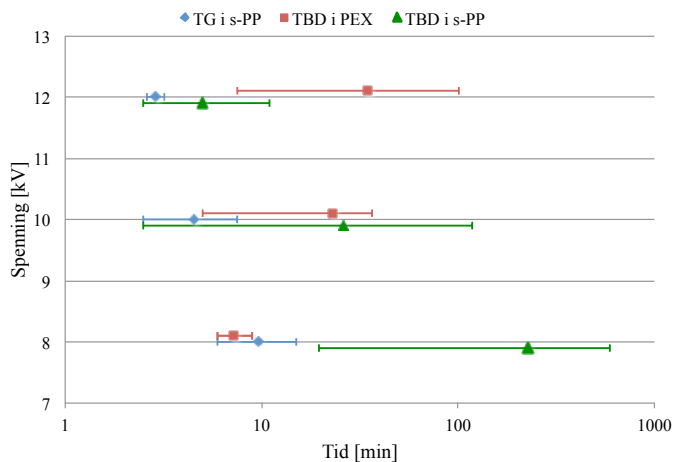


Figur 4.6: Trekanal i tilknytning til jordelektrode i s-PP ved 12 kV påtrykt spenning.

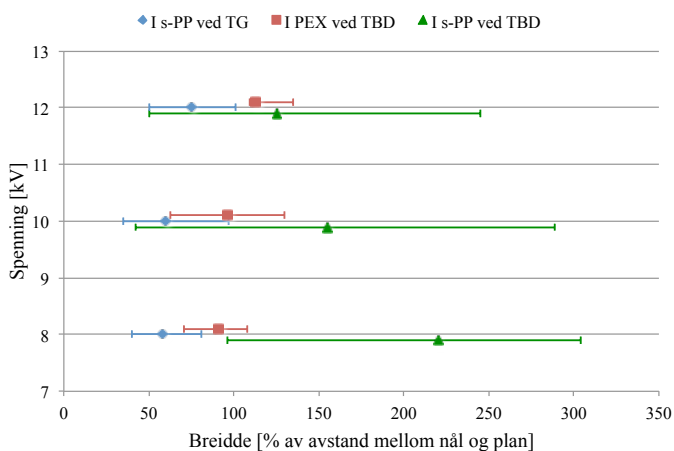
4.2 Vekstkarakteristikk for elektriske tre i PEX og s-PP

I PEX og s-PP utviklar elektriske tre seg ulikt tidsmessig. Elektriske tre i PEX får gjennomslag når fyrste grein når jordelektrode. I gjennomsnitt aukar denne tida i PEX frå 7 minutt til 34 minutt med ei auke i spenning frå 8 kV til 12 kV. I s-PP definerast to tidspunkt, tid til jord (TG) og tid til gjennomslag (TBD), for å karakterisere veksten av elektriske tre. Både TG og TBD minskar ved auka spenning i isolasjonsmateriale av s-PP. TG sin gjennomsnittsverdi er redusert frå 10 minutt til 3 minutt, medan TBD har større sprang, frå 3 timar og 47 minutt til 5 minutt når spenninga aukar frå 8 kV til 12 kV. Ei oversikt over desse resultatata er presentert grafisk i figur 4.7 med gjennomsnitts-, maksimal- og minimumsverdi. Ut i frå denne presentasjonen er det vist at TBD for s-PP har stor variasjon. Dette gjeld spesielt ved 8 kV der TBD variera frå 20 minutt til 9 timar og 53 minutt med eit gjennomsnitt på 3 timar og 47 minutt.

Resultata frå forsøka med s-PP har stort spenn, men den gjennomsnittlege verdien viser ein tendens. Ved auka spenning viser det seg at breidda til elektriske tre i s-PP blir smalare. Elektriske tre i PEX derimot har ei auke i



Figur 4.7: Oversikt over TG og TBD for elektriske tre i s-PP og PEX. Gjenomsnitt-, maksimal- og minimumsverdi, som funksjon av spenning, er presentert med logaritmisk x-akse. Initieringstida er ikke inkludert.

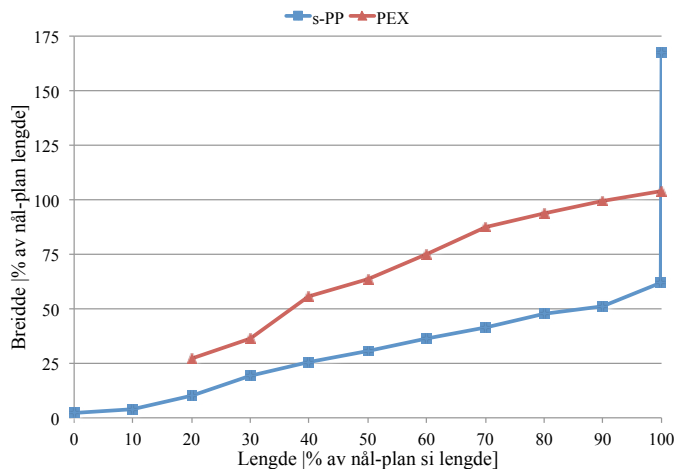


Figur 4.8: Gjennomsnittleg total breidde til elektriske tre i PEX og s-PP som funksjon av spenning med maksimal- og minimumsverdi.

breidda ved auke i spenning fram til 12 kV. Resultata viser mindre variasjon enn for PP. Ei oversikt over den total breidda sine gjennomsnittsverdiar for dei ulike forsøka er presentert grafisk i figur 4.8 med gjennomsnitt-, maksimal- og minimumsverdi.

Forholdet mellom det elektriske treet si breidde og lengde har tydelege ulikskapar for isolasjonsmateriala PEX og s-PP. I figur 4.9 visast treet si breidde

som funksjon av lengda for s-PP og PEX. Forholdet mellom breidde og lengde visar same tendens ved ulike spenningspåtrykk. I figuren er det derfor valt å bruke gjennomsnittet av alle testobjekta sine målte verdier på tvers av spenningsnivå. For elektriske tre i PEX vil breidda alltid vere større enn lengda. Ved gjennomslag er breidda og lengda omlag like store. For s-PP derimot er utviklinga annleis. Fram til lengda er 100 % av total lengde er breidda mindre enn lengda. Når lengda har sin maksimale verdi aukar breidda i gjennomsnitt frå 62 % av total lengde til 178 % av total lengde før gjennomslag.



Figur 4.9: Lengda si utvikling som funksjon av breidda til elektrisk tre i s-PP og PEX. Verdiane er gjennomsnittet frå alle testobjekt for dei ulike spenningsnivåa.

4.3 Korrelasjon mellom elektrisk trevekst og PD

Ved undersøking av PD sin korrelasjon til elektrisk trevekst vart det tatt i bruk to ulike målesystem, PD-system1 og PD-system2. Målingane gjort med PD-system1 gav data om PD-aktiviteten sin maksimale storleik. PD-aktiviteten vart registrert som funksjon av tid. PD-system2 kunne gje meir nøyaktige data om antall PD med informasjon om kvart enkelt PD-signal sin storleik og posisjon i forhold til den påtrykte spenninga si fase.

Resultat frå dei to målesystema gav samsvarande resultat når det gjaldt PD-aktiviteten sin trend som funksjon av tid, men ved vurdering av PD-aktiviteten sin storleik vart kun PD-system1 sine resultat teke i bruk. Grunnen til dette er at PD-system2 har kun vorte brukt for eitt testobjekt av s-PP og PEX ved kvart spenningsnivå. Dette er ikkje tilstrekkeleg for å kunne gje eit påliteleg resultat. Men resultatata gjev lik trend som for PD-system1, derfor er desse resultatata likevel teke med men utan fokus på talverdiar. For PD-system1 er det utført minst fire forsøk per isolasjonsmateriale ved kvart spenningsnivå, resultatata viser klare tendensar og antallet forsøk er tilfredsstillande. I PD-system2 har det vore mogeleg å registrere antall utladningar. På grunnlag av argumentasjonen over er det valt å sjå bort ifrå antall utladningar sine tallverdiar. Korleis antallet utladningar i PEX og s-PP, som funksjon av tid, skil seg frå kvarandre er derimot inkludert i analysen.

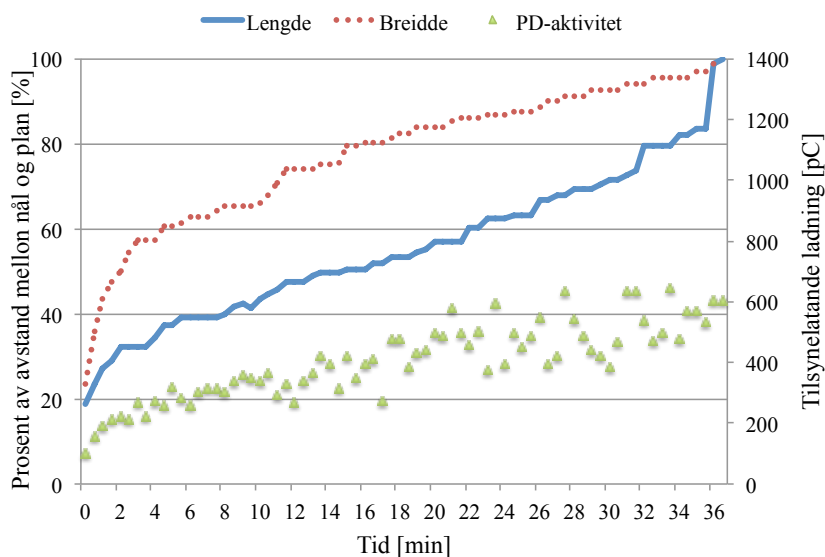
4.3.1 Kryssbunden polyetylen

I figur 4.10 er resultat frå PD-system1 presentert saman med det elektriske treet sin vekst i lengde og breidde. Det er gjort fleire forsøk for PEX ved spenningar på 8 kV, 10 kV og 12 kV. Typiske resultat frå 10 kV er presentert her medan dei to andre spenningsnivåa er presentert i vedlegg C.

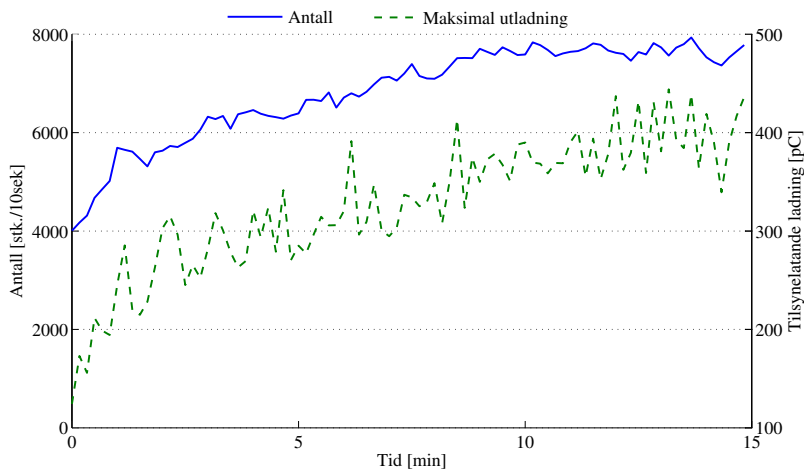
I PEX aukar den maksimale storleiken til PD-aktiviteten med auka tid. Den maksimale storleiken til PD-aktiviteten i PEX er omlag ti gonger større enn for s-PP ved 10 kV. Frå treet startar å vekse er det PD-aktivitet kontinuerleg heilt fram til gjennomslag.

Ved å auke påtrykt spenning vil den maksimale PD-aktiviteten auke frå 350 pC ved 8 kV til 900 pC ved 12 kV.

Resultata frå PD-system2 gjev tilsvarende resultat. Dei maksimale utladningane aukar med auka trevekst og det er kontinuerlig PD-aktivitet frå treet startar å vekse til gjennomslag. I figur 4.11 er resultat frå eit typisk testobjekt presentert. PD-aktiviteten er vist som funksjon av tid slik som ved PD-system1 i figur 4.10. I tillegg til utladningane sin storleik kan informasjon om antall utladningar bli registrert. Dette er og presentert i figur 4.10



Figur 4.10: Resultat frå måling med PD-system1 og treet sin vekst for PEX. Påtrykt spenning er 10 kV og tida startar å telle idet initierings-tida er over.

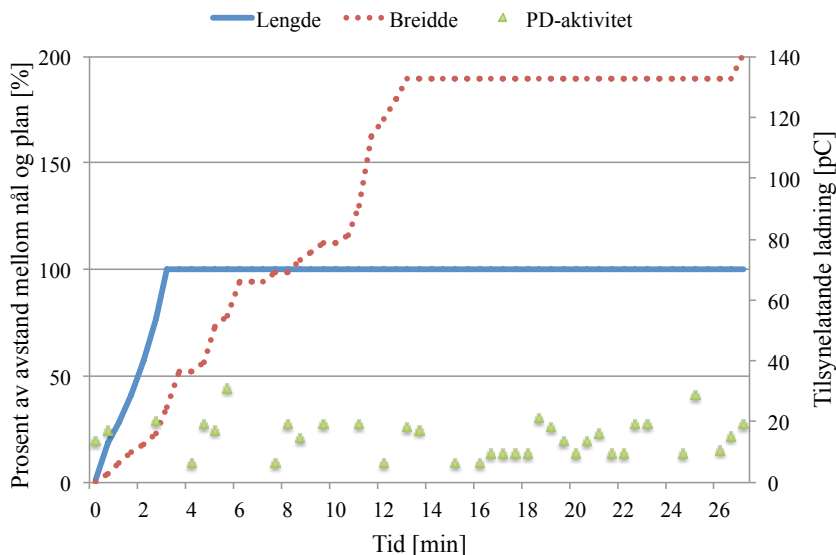


Figur 4.11: Maksimal ladning og mengde PD som funksjon av tid målt med PD-system2 for PEX. Påtrykt spenning er 10 kV og tida startar å telle idet initieringstida er over.

for 10 kV og i vedlegg C. Antallet aukar med tida treet har vokse slik den maksimale PD-amplituden gjer.

4.3.2 Syndiotaktisk polypropylen

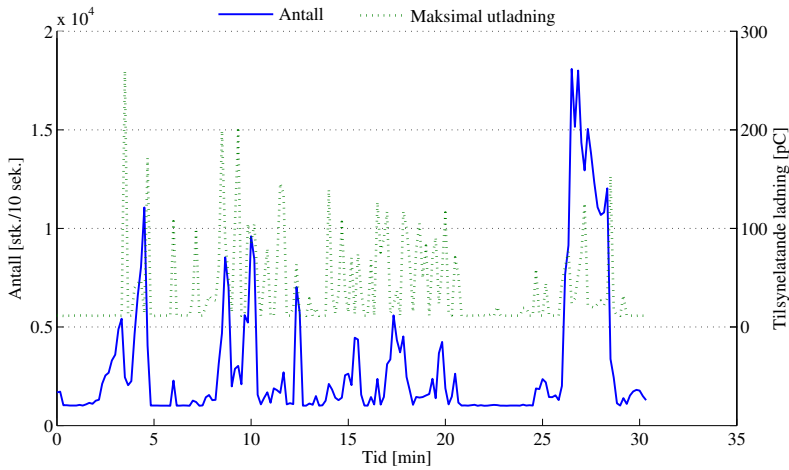
I 4.12 er resultat frå PD-system1 presentert saman med det elektriske treet sin vekst i lengde og breidde. Det er gjort fleire forsøk for s-PP ved spenningar på 8 kV, 10 kV og 12 kV. Typisk resultat frå 10 kV påtrykt spenning er presentert her medan dei to andre spenningsnivåa er presentert i vedlegg C.



Figur 4.12: Resultat frå måling med PD-system1 og treet sin vekst for PP. Påtrykt spenning er 10 kV og tida startar å telle idet initierings-tida er over.

PD-aktiviteten sin maksimale storleik i s-PP har varierende utvikling som funksjon av tida treet veks, med store og små signal om kvarandre. Dette går både ut i frå resultata frå PD-system1 og PD-system2 presentert i høvesvis figur 4.12 og figur 4.13. Utladingsaktiviteten virkar tilfeldig, det er ingen klare trekk over når PD opptrer i forhold til treveksten. Utladingane sine maksimale utslag er rundt 40 pC - 70 pC for PD-system1 og opptrer både tidleg og seint i vekstfasa. Mange av signala er små og det kan godt tenkast at ein del av PD-aktiviteten grunna trevekst er under støynivået til målesystemet. Det kan derfor vere ein del PD-aktivitet som ikkje har vorte registrert.

Den maksimale storleiken på PD-aktiviteten i PD-system1 aukar ikkje ved auka spenning. Maksimal utlading held seg under 70 pC. PD-system2 viser same trend for antall utladningar, det har stor variasjon medan treet veks.

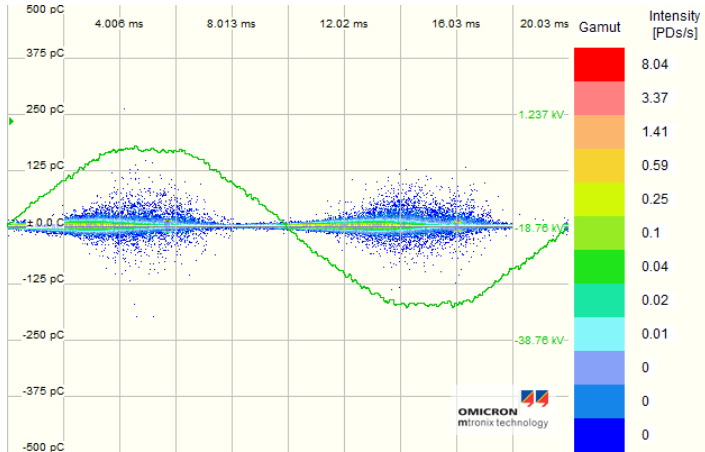


Figur 4.13: Maksimal ladning og mengde PD som funksjon av tid målt med PD-system2 for s-PP. Påtrykt spenning er 10 kV og tida startar å telle idet initieringstida er over.

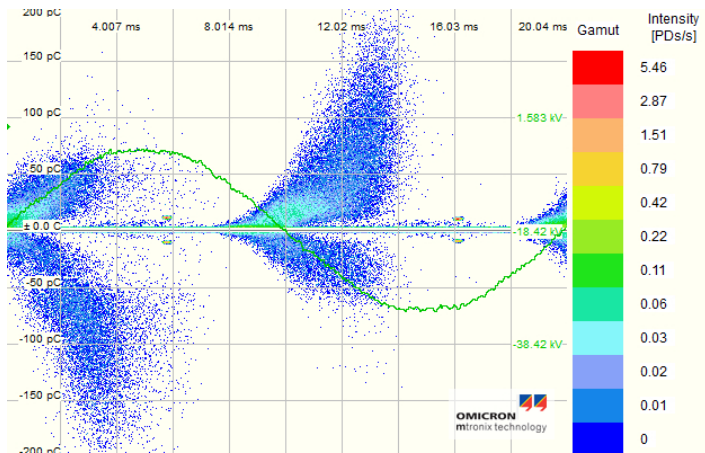
4.3.3 PD-mønster

Resultat frå PD-system2 viser tydeleg at PD i s-PP og PEX har ulike mønster. Figur 4.14 viser typisk PD-mønster i høvesvis s-PP og PEX.

I s-PP opptrer PD-aktiviteten frå omlag 0° til 180° med maksimalt utslag ved 90° der spenninga har sin toppverdi. Slik fortset det med signal mellom 180° og 360° med maksimalt utslag ved spenninga sitt toppunkt i negativ halvperiode. Dei partielle utladingane opptrer tilsynelatande likt over begge halvperiodane. I PEX er det PD-aktivitet omkring spenninga sitt nullpunkt. I kapittel 2.1 er det vist at utlading kring spenninga sitt nullpunkt er typisk for holromsutladingar.



(a) PD-mønster i s-PP



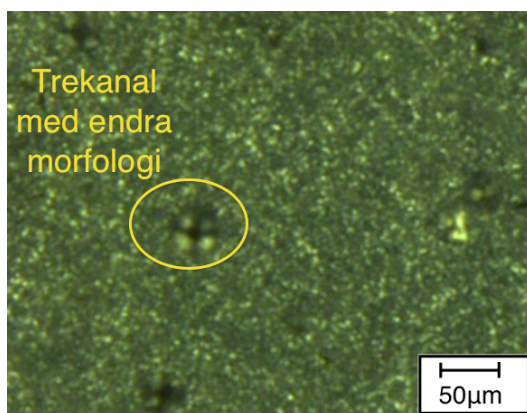
(b) PD-mønster i PEX

Figur 4.14: Typiske PD-mønster i s-PP og PEX

4.4 Material

4.4.1 Morfologi

Ved undersøking av testobjekta sin morfologi kunne det observerast minimale sfærolittar i s-PP-isolasjon etter produksjon av testobjekta. Materialet er relativt uniformt med tanke på krystallinske områder. Bilete av morfologien til eit testobjekt er vist i figur 3.10. Dei lyse punkta i biletet er område som er krystallinske.

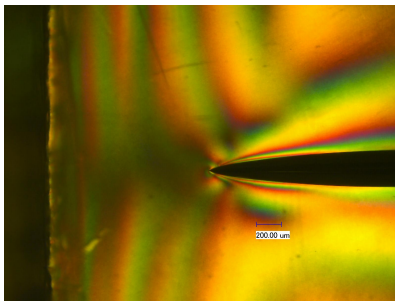


Figur 4.15: Morfologien til testobjekt av s-PP etter støyping.

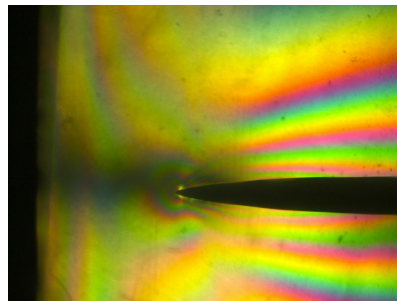
I figur 3.10 visast det at kring trekanalane er morfologien endra i forhold til i resten av materialet. Noko som tyder på varmeutvikling ved danning av trestrukturen.

4.4.2 Mekanisk spenning

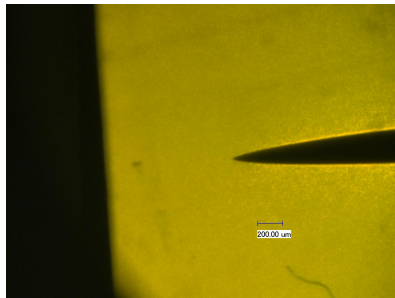
Under nedkjøling av testobjekt vil mekaniske spenningar i materialet oppstå, då isolasjon kring nål og elektrode vil bli nedkjølt raskare enn den omkringliggjande isolasjonen. I figur 4.16 visast forskjellen mellom isolasjonsmateriala PEX og s-PP. For å redusere dei mekaniske påkjenningane i PEX vart testobjekta etter støyping sett i varmeskåp i 2 døgn med ein temperatur på 90 °C. Bilete som visar korleis den mekaniske spenninga i PEX vart endra etter to døgn i varmeskåp kan sjåast i figur 4.16a og 4.16b. Dei farga linjene som kjem av mekaniske spenningar vart breiare og mindre markante. Det tyda på at dei mekaniske påkjenningane kring nålespissen vart redusert.



(a) Objekt av PEX før avspenning.



(b) objekt av PEX etter to døgn med avspenning.



(c) Objekt av s-PP utan avspenning.

Figur 4.16: Mekaniske spenningar i PEX og s-PP.

Kapittel 5

Diskusjon

Hovudformålet i denne oppgåva har vore å studere samanhengen mellom danninga av elektriske tre og tilhøyrande partielle utladningar i både PEX og s-PP. Det har blitt brukt eit nål-plan oppsett. Nåler med radius på $2\ \mu\text{m}$ på spissen og ein avstand mellom nålespiss og elektrode på $1,05\ \text{mm} \pm 0,15\ \text{mm}$ har blitt brukt som elektrode for å skape lokalt forsterka elektrisk felt. Elektrisk trevekst har blitt studert gjennom mikroskop og partielle utladningar har blitt detektert ved å registrere elektriske impulsar.

Elektriske tre sin utsjånad

Elektriske tre i s-PP og PEX har ulik struktur. I s-PP veks det ofte kun ei grein med få forgreiningar fram til jordelektroda, medan elektrisk tre i PEX som regel har mange forgreiningar heilt frå starten av. Desse resultata stemmer overeins med resultat frå tidlegare forsøk presentert i litteraturstudiet i kapittel 2.5. Ved samanlikning av PD-aktivitet og elektrisk trevekst er det i denne masteroppgåva funne små utladningar i s-PP i forhold til i PEX. Ved 10 kV er den maksimale utladningsstorleiken i PEX omlag ti gonger større enn for s-PP målt med PD-system1. Frå litteraturstudiet i kapittel 2.1 visast det at energien i ei utlading er proporsjonal med den tilsynelatande ladninga i eit PD-signal. Følgjeleg vil den frigjevne energien i eit materiale vere større ved store utladningar slik det kan observerast i PEX i motsetnad til s-PP.

Syndiotaktisk polypropylen

Polymermateriale som s-PP og PEX består av hydrogen og karbon, ved nedbryting blir atoma splitta frå kvarandre. Karbonet vil legge seg langs holrommet sine veggjar. Karbon er elektrisk leiande og vil redusere den elektriske

motstanden i trestrukturen. Med grunnlag i RC-modellen frå kapittel 2.3.1 kan det argumenterast for at ved auka leieevne i trestrukturen og konstant radius vil spenninga over isolasjonen mellom trespiss og plan auke. Ei slik utvikling kan sjåast hjå elektriske tre i s-PP fram til treet når jordelektroda. Det elektriske treet har liten vekst i breidda og veks jamnt i lengderetning mot jord, resultat i figur 4.12 viser dette. Nedbryting ser i følgje kapittel 2.1 ut til å auke med auka påtrykt spenning. Dette stemmer overeins med resultatata frå kapittel 4.2 og figur 4.7 som viser at dei elektriske trea i s-PP veks fortare til jord ved auka påtrykt spenning. TG blir redusert i gjennomsnitt frå 9 minutt og 36 sekund ved 8 kV til 2 minutt og 54 sekund ved 12 kV.

Kryssbunden polyetylen

I motsetnad til elektriske tre i s-PP vil elektriske tre i PEX bruke lengre tid fram til gjennomslag ved auka spenning, dette er vist i figur 4.7. TG aukar i gjennomsnitt frå 7 minutt og 12 sekund ved 8 kV til 34 minutt og 30 sekund ved 12 kV. Dette kan sjåast i samanheng med treet si form. Resultat frå kapittel 4.1.1 viser at elektriske tre går frå grein- til buskform ved auka spenning. Dersom det elektriske treet blir sett på som ei forlenging av nåla sin spiss vil dette påverke det elektriske feltet si fordeling. Som vist i figur 2.5 vil ei auke av nåla sin radius gje ein reduksjon i den elektriske feltstyrka rundt nålespiss som fører til at PD-aktiviteten i lengderetning vil minke. Når treet sin radius aukar vil kapasitansen til jord auke som vist i likning 2.7 i kapittel 2.3.1. Ut i frå RC-modellen i same kapittel gjev ei auke i kapasitansen sin verdi ein reduksjon av spenninga over isolasjonen mellom trespiss og plan. Dette kan forklare PEX sin buskvekst ved høgare spenningar, som vist i figur 4.2. Treet veks fort i breidda og kapasitansen sin verdi aukar. Det fører til at spenninga i hovudsak vil ligge over trestrukturen. For å oppnå same spenning over isolasjonen mellom trespiss og plan som ved liten treradius må trestrukturen ha ei betre leieevne. Det vil seie at treet må ha meir karbon langs veggane i trekanalen, noko som kjem ved auka nedbryting.

Frå litteraturstudiet i kapittel 2.5 er det funne motstridande resultat om korleis den elektriske trestrukturen endrar seg i PEX ved endring av spenning. Resultat frå eksperimentelle forsøk i denne masteroppgåva er i samsvar med resultat frå mellom anna Chen [24]. Ei auke i spenning vil føre til at trestrukturen i PEX går frå greinstruktur til buskstruktur, slik det er vist i kapittel 4.1.1. Dette kan bli forklart ved at ei auke i spenning vil gje fleire partielle utladingar, som vist i kapittel 2.1. Partielle utladingar er drivkraften til elektriske tre, større PD-aktivitet vil då føre til at fleire parallelle greiner blir danna og buskstruktur utviklar seg.

Partielle utladningar

Resultat frå eksperimentelle forsøk i denne oppgåva gjev ulik PD-aktivitet for elektrisk trevekst i s-PP og PEX. To ulike målesystem er nytta og gjev begge samsvarande resultat når det gjeld PD-aktiviteten sin trend. I PEX aukar den maksimale PD-amplituden med auka tid og treet sin storleik. Frå treet blir initiert fram til gjennomslag er det kontinuerleg PD-aktivitet. Dette er i motsetnad til PD-aktiviteten i s-PP. Her opptrer PD-signala med varierende aktivitet. Det kan vere tidsintervall med PD-aktivitet og påfølgjande tidsintervall utan aktivitet i det heile teke. Eksempel på dette i kapittel 4.3 og vedlegg C. Grunnen til dette kan vere at utladningane har vore så små at dei vore under støynivået og dermed ikkje vorte registrert. I s-PP har utladningane vore mindre enn i PEX, ved 10 kV var dei målte utladningane 10 gonger større i PEX enn s-PP, som vist i kapittel 4.3. Små utladningar i s-PP kan mellom anna kome av at det er færre forgreiningar i s-PP, at det er høgare trykk i trekanalane eller at utladningane skjer over kortare avstandar.

Elektriske tre i polymerisolasjon kan bli sett på som gassfylte kanalar. Kanalane har vorte danna ved at partielle utladingar har brote ned isolasjonsmaterialet. I eit elektrisk tre kan gasstrykket variere og dermed vil og gjennomslagsspenninga variere i følgje Paschen sin teori i kapittel 2.3.2. I trestrukturen vil karbon leggje seg langs veggane i trekanalane. Mengde karbon vil variere og føre til varierende elektrisk leieevne. Trekanalane kan ekvivalerast som ein krets beståande av repeterande elektriske motstandar og kapasitansar. Spenning vil byggje seg opp over trestruktur med dårleg leieevne, kapasitive element, og gje lokal PD. Dette vil gje opphav til varierende PD-aktivitet i lengda av trestrukturen og nye greiner kan oppstå på grunn av lokal erosjon.

Det interessante med elektriske tre i s-PP i forhold til elektriske tre i PEX er at elektriske tre i s-PP ikkje nødvendigvis får gjennomslag idet fyrste grein når jordelektroda. Om dei elektriske trea i s-PP fortset å vekse vil nye parallelle greiner til jord bli danna. Eksempel på slik trestruktur blir vist i figur 4.6a, der kan ein sjå at gass frå trekanalane blir frigjeve på jordelektroda si overflate noko som tyder på det er høgt gasstrykk inne i trekanalane. Utifrå Paschen si lov vil høgt gasstrykk auke gjennomslagsspenninga, men når gassen blir frigjeve vil trykket og gjennomslagsspenninga minke. Det kan forklare kvifor treet ikkje får gjennomslag før etter at fleire greiner har nådd jordelektroda. Då har gassutslepp redusert gjennomslagsspenninga til eit nivå som fører til gjennomslag. Ved kraftige partielle utladningar kan isolasjonsmaterialet smelte på grunn av frigjeven varme, slik det er vist i resultatata i kapittel 4.4.1. s-PP er ein termoplast der materialet etter smelting raskt vil verte rekrystallisert og dei elektriske eigenskapane vil bli gjenvunne. Istadenfor at ein eksisterande kanal vert utvida fram til gjennomslag vil denne eigenskapen truleg vere avgjerande for at nye parallelle greiner veks fram. Gjennomslag verkar til å skje når ei tilfeldig grein med god nok leieevne

veks fram til jordelektrode.

Isolasjonsmaterialet

Ut i frå materialeegenskapane til PEX og s-PP, presentert i kapittel 2.4, er det forventa at elektriske tre i s-PP vil vekse saktare enn elektriske tre i PEX. Ved samanlikning av treet si form i s-PP og PEX kan det observerast at trea i PEX har fleire forgreiningar. I figur 4.4a og 4.1a er det bilete av elektriske tre i høvesvis s-PP og PEX 15 sekund etter at initieringa er over, begge har 8 kV påtrykt spenning. På 15 sekund har det vokse mange fleire greiner i PEX og eit større volum av isolasjonen har blitt nedbrote. Dette viser at elektrisk trekanalar oppstår fortare i PEX enn s-PP og stadfestar at materialet sine eigenskapar påverka elektrisk trevekst.

Feilkjelder

Feilkjelder i denne masteroppgåva basera seg i all hovudsak på måleusikkerheit og forhold under produksjonen av testobjekt.

Ved innsetjing av nåler i testobjekta blir lengde mellom nålespiss og plan og radius på nål målt. For at testobjekta skal ha forholdsvis lik geometri vart det bestemt ein verdi for radius til nåla og avstand mellom nål og plan. Nålespissen sin radius vart sett til $2\ \mu\text{m}$ og avstanden mellom nålespiss og elektrode var $1,05\ \text{mm} \pm 0,15\ \text{mm}$, dette vart målt i mikroskop. Målingane som vart gjort ved hjelp av mikroskopet vart gjort manuelt, noko som kan ha ført til unøyaktige måleverdiar. Ulike verdiar på radius og avstand mellom nål og plan fører til ulik elektrisk feltstyrke i prøveobjektet når lik spenning er påtrykt. Det er valt å ikkje ta med resultat kring dei elektriske trea si initieringstid på grunn av endring i feltstyrke grunna nåleradius, som forklart i kapittel 3.5. Variasjon av avstanden mellom nålespiss og plan har ikkje like stor innverknad på den elektriske feltstyrken. Mason [18] si likning frå kapittel 2.3.1 kan brukast for å rekne ut det elektriske feltet ved nålespiss. Ved ei auke av avstand frå nålespiss til plan frå 0,9 mm til 1,2 mm, ved 10 kV og med ein nålradius på $2\ \mu\text{m}$ vil det elektriske feltet reduserast frå 1330 kV/mm til 1200 kV/mm.

Måling av lengder ved hjelp av mikroskop har og blitt brukt til å måle dei elektriske trea sin vekst i lengde og breidde. Det vil derfor ligge ein usikkerheit i dei målte verdiane. For resultatata vil ikkje dette ha stor innverknad. Det har blitt fokusert på tendensane som viser korleis breidda og lengda utviklar seg i forhold til kvarandre framfor dei målte talverdiane. Måleresultatata viser klare tendensar som skil trevekst i PEX og s-PP frå kvarandre.

Ved registrering av PD-aktivitet med PD-system1 kan feil ha oppstått. Dei

registrerte signala frå måling av PD er basert på manuell avlesing frå PD-plot frå oscilloskopet. Dette kan føre til unøyaktige avlesingar av PD-aktiviteten sine verdiar. Samstundes vil signal frå støykjelder kunne gje ukorrekt bilete av målte PD-aktiviteten i testobjektet, slik det er forklart i kapittel 3.5.2.

Ved registrering av måledata har måleutstyr sett grenser for kor ofte data kan registrerast. I denne masteroppgåva har data blitt registrert kvart 30. sekund. Dermed vil dei tidene som er registrert for mellom anna gjennomslag og tida det tek før fyrste grein når jord vere med 30 sekund nøyaktigheit. Det vil sei at den registrerte hendinga vil ha skjedd no eller i løpet av dei 30 siste sekunda.

Bilete av trevekst har blitt fotografert ovanfrå og ned på testobjektet, normalt på trevekstretninga. Den elektriske treveksten veks, som vist i kapittel 4.1, i fleire retningar i isolasjonsmaterialet. Mikroskop har ei begrensa fokusdjubde og kan derfor gje eit forvrengt bilete av treet. Dette vil påverke dei målte verdiane av treet si breidde og lengde.

Elektrisk trevekst har ein stokastisk karakter. Gjennomsnittsverdiar har blitt brukt ved presentasjon av resultat. Det er i det praktiske arbeidet utført minst fire forsøk for kvart testobjekt ved kvart spenningsnivå. Det kan diskuteras om 4 forsøk er tilstrekkeleg for å oppnå statistisk validitet.

Ved presentasjon av dei partielle utladningane sin aktivitet er det ikkje teke gjennomsnittsverdiar. I til dømes s-PP ville eit gjennomsnitt ha jamna ut dei variasjonane ein ser i PD-aktiviteten som vist i til dømes figur 4.12. For å gje eit mest mogleg korrekt bilete av korleis PD-aktiviteten har vore, har det blitt valt å presentere resultat frå enkelte testobjekt som visar typiske resultat ved si spenning.

Kapittel 6

Konklusjon

I denne masteroppgåva har elektrisk trevekst i ein nål-plan geometri blitt undersøkt. Kryssbunden polyetylen (PEX) og syndiotaktisk polypropylen (s-PP) har vorte undersøkt som isolasjonsmateriale ved ulike spenningsnivå. Hovudformålet har vore å undersøke korrelasjonen mellom elektrisk trevekst og partielle utladningar i begge isolasjonsmateriala. Hovudkonklusjonane som kan trekkast ut frå arbeidet blir presentert i det følgjande.

- Ved auka spenning vart det observert at elektriske tre i PEX endrar seg, forma gjekk frå å vere greinstruktur til å vere buskstruktur. Dette skjedde ved overgangen frå 8 kV til 10 kV. Elektriske tre i s-PP hadde derimot greinstruktur frå 8 kV til 12 kV. Greinstrukturen i s-PP hadde færre forgreiningar enn greinstrukturen i PEX.
- Elektriske tre i PEX førte til gjennomslag med ei gong fyrste grein nådde jordelektroda. I s-PP vart det oftast danna fleire parallelle greiner til jord før gjennomslag.
- Tida det elektriske treet brukte fram til gjennomslag var ulik i dei to isolasjonsmateriala. I PEX auka tid til gjennomslag ved auka spenning frå 8 kV til 12 kV, medan i s-PP minka denne tida.
- Elektriske tre og partielle utladningar i s-PP og PEX oppførte seg ulikt. I PEX hadde trea fleire forgreiningar enn i s-PP, og dei partielle utladningane var større i PEX enn s-PP. Ettersom treet vaks og blei større blei dei partielle utladningane større og dei opptredde kontinuerleg i PEX. Utladningane i s-PP auka ikkje ved auka spenning og opptredde tilsynelatande tilfeldig etterkvart som treet vaks.

Ut i frå dette kan det stadfestast at det er ein samanheng mellom elektrisk trevekst og partielle utladningar. Elektriske tre utviklar seg ulikt i PEX og s-PP. Det ser ut til at dei forholda som påverkar PD-aktiviteten vil vere med å avgjere treet si form.

6.1 Vidare arbeid

PD-system2 gjev nøyaktige målingar. I denne masteroppgåva har det vore mykje støy under målingane med PD-system2. I vidare arbeid vil det vere interessant å gjere fleire målingar med dette systemet slik at utladningane sin storleik og antall utladningar kan bli målt meir nøyaktig. Då må fyrst kretsen forbeholdast for å redusere støynivået.

I denne masteroppgåva er det anteke at leieevna i dei elektriske trestrukturene aukar ved auka nedbryting. Dette er på grunn av at isolasjonsmaterialet består av karbon. Karbon er elektrisk leiande og ved nedbryting av isolasjonsmaterialet vil karbon legge seg langs trekanalane sine veggjar. Å finne ein metode for å kunne bestemme mengde karbon i trekanalane eller trekanalane sin leieevne vil vere interessant. Det vil gje informasjon om forskjellane i PEX og s-PP under nedbryting og danning av elektriske tre.

For vidare kartlegging av elektrisk trevekst vil det vere nyttig å bruke eit elektron mikroskop, SEM, som kan gje bilete av dei ulike trestrukturene. Då kan trekanalane sin storleik og struktur undersøkast.

Bibliografi

- [1] Degradation of solid dielectrics due to internal partial discharge: some thoughts on progress made and where to go now. *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, 12(6):1275, dec. 2005.
- [2] S.A. Boggs. Partial discharge. iii. cavity-induced pd in solid dielectrics. *Electrical Insulation Magazine, IEEE*, 6(6):11 –16, nov.-dec. 1990.
- [3] Xiangrong Chen, Yang Xu, Xiaolong Cao, S.J. Dodd, and L.A. Dissado. Effect of tree channel conductivity on electrical tree shape and breakdown in xlpe cable insulation samples. *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, 18(3):847 –860, june 2011.
- [4] NAVAL SEA SYSTEM COMMAND. Sd18 part requirement and application guide.
- [5] L.A. Dissado and J.C. Fothergill. *Electrical Degradation and Breakdown in Polymers*. The Institution of Engineering and Technology, 2008.
- [6] J. Holto and E. Ildstad. Electrical tree growth in extruded s-polypropylene. pages 1 –4, july 2010.
- [7] J. Holto and E. Ildstad. Electrical treeing in extruded polypropylene high voltage cable insulation. pages 373 –376, oct. 2010.
- [8] Jorunn Holto, Erling Ildstad, and Ingeborg Lunde. Characteristics of electrical treeing in extruded polypropylene and cross-linked polyethylene cable insulation. *ICHVE*, 2012.
- [9] Erling Ildstad. Compendium for condition assessment of high voltage apparatus elk-30. Technical report, NTNU, Institutt for Elkraftteknikk, 2009.
- [10] Erling Ildstad. *TET 4195 High Voltage Equipment, Cable Technology*. NTNU, 2009.
- [11] Erling Ildstad. *Electric Power Engineering, TET 4160 High Voltage Insulating Materials*. NTNU, 2010.

- [12] Erling Ildstad and Jorunn Hølto. Comparison of electrical treeing in polypropylene and cross linked polyethylene. *NORD-IS 09*, June 2009.
- [13] G. Jiang, J. Kuang, and S. Boggs. Critical parameters for electrical tree formation in xlpe. *Power Delivery, IEEE Transactions on*, 13(2):292 – 296, apr 1998.
- [14] D.W. Kim and K. Yoshino. Morphological characteristics and electrical conduction in syndiotactic polypropylene. pages 464–471, january 2000.
- [15] E. Kuffel, W.S. Zaengl, and J. Kuffel. *High Voltage Engineering: Fundamentals*. Butterworth-Heinemann, 2001.
- [16] K. Kurahashi, Y. Matsuda, A. Ueda, T. Demura, Y. Miyashita, and K. Yoshino. The application of novel polypropylene to the insulation of electric power cable. 2:1278 – 1283 vol.2, oct. 2002.
- [17] Lars Lundgaard. Partielle utladninger begreper, måleteknikk og mulige anvendelser for tilstandskontroll. Technical report, Energiforsyningens Forskningsinstitutt AS, SINTEF, 1996.
- [18] J.H. Mason. The deterioration and breakdown of dielectrics resulting from internal discharges. *Electrical Engineers, Journal of the Institution of*, 1951(2):76, february 1951.
- [19] NVE. Kte-notat nr. 42/03. kabel som alternativ til luftledning.
- [20] Y. Shibuya, S. Zoledziowski, and J.H. Calderwood. Void formation and electrical breakdown in epoxy resin. *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on*, 96(1):198 – 207, jan. 1977.
- [21] Heng Sui, LiMing Shen, Wei Wang, YanLong Yu, Zan Wang, and Chaofei Gao. Pd detecting during the growth of electrical trees in hv xlpe cable. In *Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2011 Asia-Pacific*, pages 1 –4, march 2011.
- [22] Katsumi Yoshino, Tsuyoshi Demura, Masaki Kawahigashi, Yoshitsugu Miyashita, Kiyoshi Kurahashi, and Yoshiji Matsuda. Application of a novel polypropylene to the insulation of an electric power cable. *Electrical Engineering in Japan*, 146(1), 2004.
- [23] Marit Holbø Ytterstad. Kvalitetssikring av polymerisolerte hvdc kabler ved hjelp av spenningsprøving. Master’s thesis, NTNU, 2008.
- [24] Tianchun Zhou, Ling Liu, Ruijin Liao, and G. Chen. Study on propagation characteristics and analysis of partial discharges for electrical treeing in xlpe power cables. pages 1 –4, july 2010.

Vedlegg A

Kalibrering

Tabell A.1: Måling av støynivå i målekrins

Støynivå	
ΔV [mV]	Amplitude [mV]
4,6	2,3

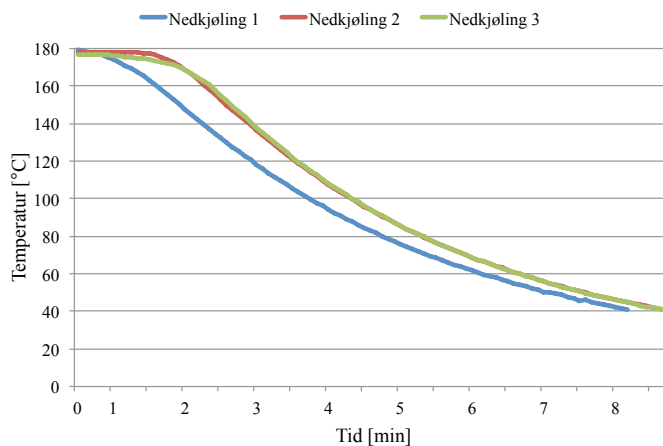
Tabell A.2: Kalibrering av PD-måling

Ladning [pC]	ΔV [mV]	Amplitude [mV]
+100	173	86,5
-100	227,5	113,75
+50	110,8	55,4
-50	139,4	69,7
+20	61,4	30,7
-20	66,5	33,25
+10	29,4	14,7
-10	30,5	15,25
+5	10,2	5,1
-5	10,5	5,25
+2	5,5	2,75
-2	5,6	2,8
+1	5,3	2,65
-1	5,4	2,7

Vedlegg B

Vassavkjøling av testobjekt

Det er ynskjeleg med ei jamn nedkjøling av testobjektet ved støyping. Ved nedkjøling har temperaturen vorte målt, resultatata av tre slike målingar er presentert i figur B.1.



Figur B.1: Temperaturendring ved avkjøling av testobjekt

Avkjølinga har ei gjennomsnittleg rate på $17,5^{\circ}\text{C}/\text{min}$.

Vedlegg C

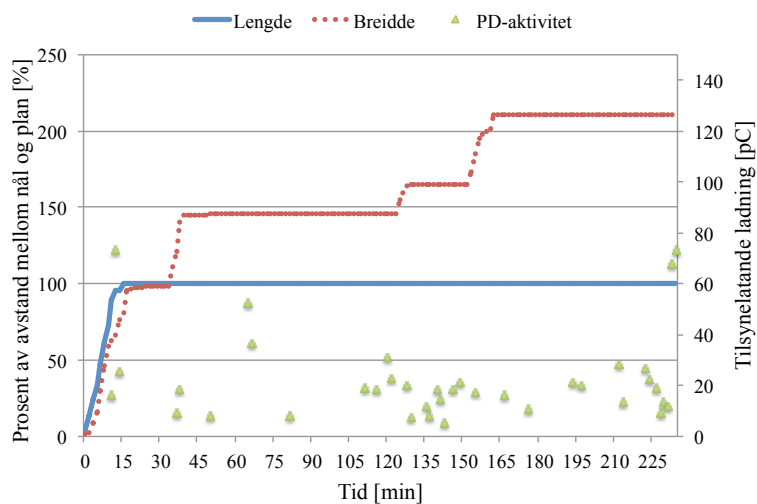
PD og trevekst

Under studie av elektriske tre vart PD-aktivitet registrert medan det elektriske treet vaks. Det vart gjort forsøk ved 8 kV, 10 kV og 12 kV for testobjekt av både polypropylen og kryssbunden polyetylen.

Ved presentasjon av resultat frå desse målingane er det valt å vise bilete frå kvart spenningsnivå og for kvart isolasjonsmaterial. Det vil bli misvisande å bruke gjennomsnittsverdiar for dei partielle utladningane, spesielt for partielle utladningar i s-PP. Det er fordi dei partielle utladningane i s-PP har stor variasjon under heile treveksten. Det er derfor valt å vise bilete av typiske resultat ved kvart spenningsnivå. Sidan bilete av PD og trevekst allereie er presentert for syndiotaktisk polypropylen og kryssbunden polyetylen ved 10 kV i kapittel 4.3 utelatast dei bileta her.

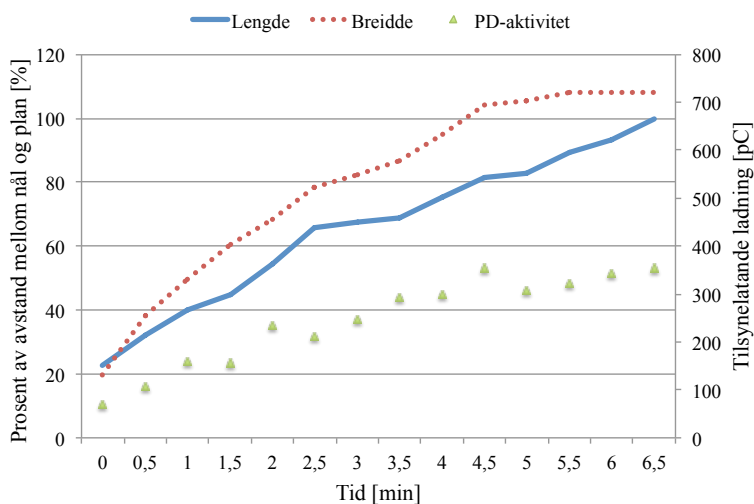
Det er gjort måling av partielle utladingar med to målesystem, PD-system1 og PD-system2. Det vil derfor leggest med bilete frå kvart av desse systema, med unntak av s-PP-isolasjon med 8 kV påtrykt spenning og PEX-isolasjon med 12 kV påtrykt spenning. I PD-system2 brukast Matlab til å behandle måledata. For desse to spenningsnivåa og isolasjonsmateriala blir antall PD så mange at Matlab ikkje har minne nok til å behandle dei. Mange av PD signala er frå støykjelder, om desse hadde vorte eliminert hadde kanskje antallet vorte lite nok til å kunne behandlast med Matlab.

C.1 Testobjekt av s-PP og 8 kV påtrykt spenning.

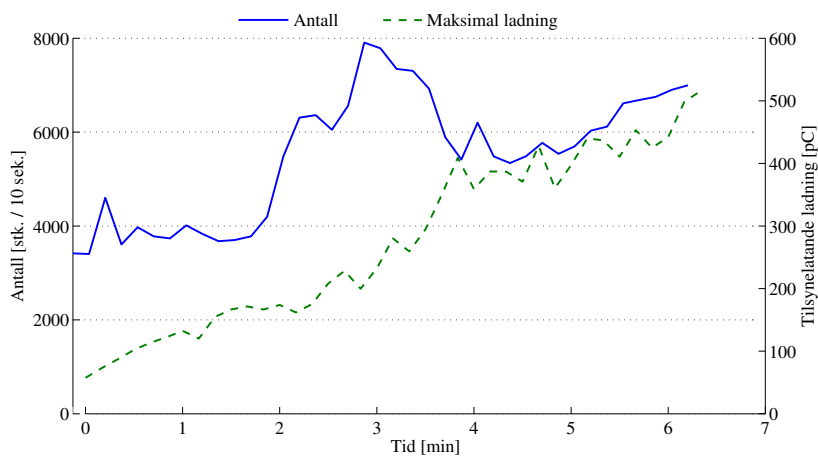


Figur C.1: Resultat frå måling av PD med PD-system1 og treet si vekst for s-PP. Påtrykt spenning er 8 kV og tida startar å telle idet initieringstida er over.

C.2 Testobjekt av PEX og 8 kV påtrykt spenning.

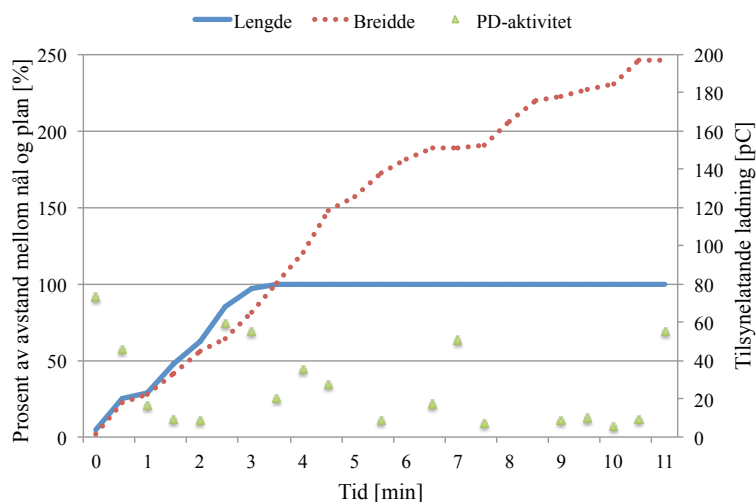


Figur C.2: Resultat frå måling av PD med PD-system1 og treet si vekst for PEX. Påtrykt spenning er 8 kV og tida startar å telle idet initieringstida er over.

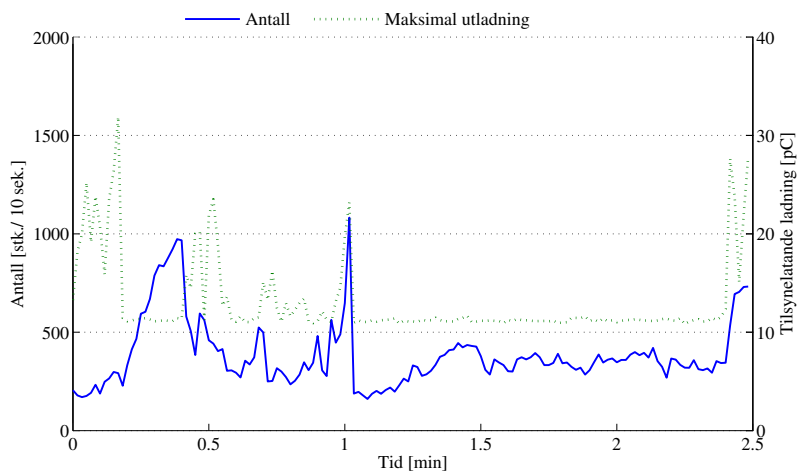


Figur C.3: Resultat frå måling av PD med PD-system2 og treet si vekst for PEX. Påtrykt spenning er 8 kV og tida startar å telle idet initieringstida er over.

C.3 Testobjekt av s-PP og 12 kV påtrykt spenning.

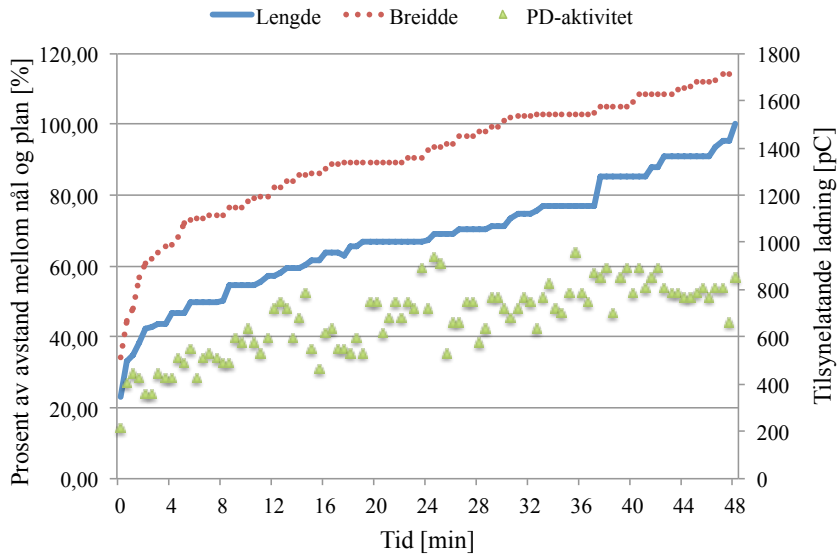


Figur C.4: Resultat frå måling av PD med PD-system1 og treet si vekst for s-PP. Påtrykt spenning er 12 kV og tida startar å telle idet initieringstida er over.



Figur C.5: Resultat frå måling av PD med PD-system2 og treet si vekst for s-PP. Påtrykt spenning er 12 kV og tida startar å telle idet initieringstida er over.

C.4 Testobjekt av PEX og 12 kV påtrykt spenning.



Figur C.6: Resultat frå måling av PD med PD-system1 og treet si vekst for PEX. Påtrykt spenning er 12 kV og tida startar å telle idet initieringstida er over.

Vedlegg D

Matlab kode

Kode for å importere data frå PD-system2 til matlabfil:

```
1 %folder = current folder name;
2 folder=pwd;
3 % Import Q-data
4 [q_tm, q]=importQData(folder, 'unit1.1');
5 % Import phase-data
6 phase = importPHData(folder, 'unit1.1');
7 phase=phase*360;
8 % Import voltage-data
9 [v_tm, v] = importVData(folder, 'unit1.1');
```

Data som er importert frå PD-system2 kjem som tabell med informasjon om kvar enkelt utlading. Det er informasjon om tidspunktet utladninga har funne stad, `q_tm`, utladninga sin storleik, `q`, og utladninga sin plasing i forhold til den påsette spenninga, `phase`. I denne oppgåva er utladninga sin storleik og kva tid den har oppstått interessant. Koda som er laga for å bearbeide datamateriale frå PD-system2 er lista opp under.

```
10 %Input fra brukaren
11 t1=input('Skriv inn starttidspunkt i sekund ');
12 step=input('Skriv inn intervallet si lengde i sekund ');
13 t=input('Skriv inn tidspunkt for gjennomslag ');
14 t3 = t + t1; %Tida det er gjennomslag
15 t2 = t1 + step;
16
17 %deklarasjon av variablar
18 t1_rekke = 0;
19 t1_pos = 0; %posisjon i q ved tidspunkt t1
20 t2_rekke = 0;
21 t2_pos = 0; %posisjon i q ved tidspunkt t2
22 r=1;
23 data = zeros(r,4); %matrise: [nr, antall n, ...
    qmaks_abs, q_snitt]
```

Vidare nyttast ei while-løkke, den kjører nye intervall så lenge gjennomslag ikkje har skjedd.

```

24 while (t1 < (t3))
25     %finn posisjonen til t1 og t2
26     t1_rekke = find(q_tm<t1);
27     t1_pos = length(t1_rekke);
28     t2_rekke = find(q_tm<t2);
29     t2_pos = length(t2_rekke);
30     %nullstilling og deklarasjon av variablar
31     sumq=0;                               %total utlading i intervall
32     n = 1;                                 %antall utladningar i ...
        intervall
33     data(r,1) = ((r-1)*(step/60));         %nr. paa intervall
34     data(r,3) = 0;

```

I kvart intervall brukast ei for-løkke til å gå gjennom alle verdiane til q frå t1 til t2. Her blir den maksimale utladninga, den gjennomsnittlege utladninga og antall utladningar registrert.

```

35     for i = (t1_pos + 1) : (t2_pos)         %har t1+1 for aa unngaa ...
        aa starte paa plassering 0.
36
37     %if-løkke: finne maksimale ladning i absoluttverdi
38     if data(r,3) < abs(q(i))
39         data(r,3) = abs(q(i));
40     else
41         data(r,3) = data(r,3);
42     end
43
44     %Finn fortlopende gjennomsnittleg ladning
45     sumq = sumq + abs(q(i));
46     data(r,4) = sumq/n;
47     %lagrar fortlopende antall utladningar
48     data(r,2) = n ;
49     %Oppdaterer tellaren for antall utladningar til neste ...
        iterasjon.
50     n = n+1;
51     end
52
53     %Oppdaterer variablar til neste iterasjon
54     t1 = t1 + step;
55     t2 = t2 + step;
56     r = r + 1;
57
58 end
59
60 % Gjer om ladninga sin storleik til picocoloumb
61 data(:,3) = data(:,3)/(1e-012);
62 data(:,4) = data(:,4)/(1e-012);
63
64 %
65 mengde_storleik(data(:,1), data(:,2), data(:,3))
66 mengde_gjsnittQ(data(:,1), data(:,2), data(:,4))

```

Vedlegg E

Publikasjon

Resultat frå denne masteroppgåva vil bli presentert på konferanseen *International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE)* i Kina i september 2012. I tilknytning til denne presentasjonen er det skrive ein artikkel. Artikkelen har tittel *Characteristics of Electrical Treeing in Extruded Polypropylene and Cross-Linked Polyethylene Cable Insulation* og forfattarane er: Jorunn Hølto, Erling Ildstad og Ingeborg Lunde. Artikkelen ligg vedlagt på dei neste fire sidene.

Characteristics of Electrical Treeing in Extruded Polypropylene and Cross-Linked Polyethylene Cable Insulation

Jorunn Holto, Erling Ildstad and Ingeborg Lunde
Norwegian University of Science and Technology
Trondheim, Norway

Abstract -This paper presents results from experimental investigations performed in order to characterize and compare electrical tree formation in extruded syndiotactic polypropylene (s-PP) and cross-linked polyethylene (XLPE) cable insulation. All tests were performed using molded needle-plate samples with an insulation distance of 1.05 mm. Initiation and formation of electrical trees from the needle tips were studied using partial discharge measurements and optical microscopy video techniques. The tree growth was characterized by measuring length and width of the trees, the time needed for the first branch to reach the opposite ground electrode and time to electric breakdown. The effect of different AC voltages, with magnitudes up to 12 kV and frequencies in the range of 50 - 1000 Hz, were examined.

In XLPE electrical trees were found to develop in a stepwise manner, with high degree of branching associated with high partial discharge (PD) activity. Electric breakdown typically occurred when the first tree tip reached the ground electrode.

In s-PP the initial degree of branching was relatively low, without detectable partial discharge activity. Typically several parallel branches had to reach the ground electrode before breakdown occurred. At increasing frequencies the tree width and degree of branching was found to increase. Meanwhile the time until the first tree branch reached the ground electrode and the time to breakdown was found to decrease with increasing frequency above 300 Hz.

These observations are in agreement with the proposed RC-model of an electric tree, which implies that the voltage distributed along the tree channel increase with frequency. Thus the likelihood of partial discharges along the existing tree length will also increase with the frequency of the applied voltage.

I. INTRODUCTION

Isotactic polypropylene (i-PP) is today used as thin film insulation for example in capacitors. But the material is not suited as bulk insulation because it is too brittle and growth of spherulites during cooling is very temperature dependent. Syndiotactic polypropylene (s-PP) is extrudable and has mechanical properties which make it a candidate for power cable insulation. As the operating temperature of XLPE cables is limited to 90 °C s-PP may be considered an alternative in case of high temperature applications [1] due to its higher melting point ($T_m = 130$ °C). Testing of thin films has shown that both the AC and impulse breakdown strength are higher for s-PP than XLPE and i-PP [2]. Other favorable electrical properties include low permittivity, dielectric loss and conductivity [1,2].

The knowledge regarding mechanisms of ageing and factors limiting the breakdown strength of extruded s-PP insulation systems is, however, very limited. Therefore the main purpose of the work presented here has been to

compare electrical tree formation in s-PP and XLPE during AC voltages at different frequencies. The results are discussed with respect to the electro-mechanical theory of electrical treeing, considering void formation due to partial discharge degradation, fracture toughness and degradation of the polymer. A theoretical model based on the resistive and capacitive voltage distribution along the tree channel is presented and used to explain the voltage and frequency dependence of the observations.

II. ELECTRICAL TREE FORMATION

Electrical treeing is generally considered the main pre-breakdown ageing mechanism of extruded polymeric insulation during dry service conditions [3]. It is common to distinguish between 3 stages of tree formation: Inception, propagation and breakdown [3]. Tree initiation occurs in regions of high field enhancement, due to conducting irregularities or contamination. In these regions charge is injected and space charge may accumulate. During polarity reversal it is likely that flow of charge causes breaking of chemical bonds and mechanical fatigue. Eventually a void is created in which partial discharges (PD) will occur, which then facilitate extension of the void and initiation of a hollow tree channel. Further tree propagation is caused by PD activity, which induces local heating and charge injection, erosion and chemical degradation of the material. The latter may provoke gas formation and carbonization of the channel walls. The gas composition and pressure will strongly affect the PD activity in the channel, which may start and stop in a random manner due to increased pressure. Conducting carbon deposits in the extending channels and local space charge accumulation lead to a strongly modified electric field distribution. Induced local electrical shielding may also contribute to stepwise growth [3]. The trees develop different appearances, of branched structures with different densities and number of branches growing towards the ground electrode or bush-like trees. The structure is found to be dependent on for example the chemical and mechanical properties of the material [4], applied voltage magnitude and frequency [5]. Finally electrical breakdown occurs when the channel resistance becomes sufficiently low, causing local heating and melting of the surrounding polymer.

In XLPE electrical trees are found to be hollow channels, which originate in regions of enhanced electric field and cause breakdown when bridging the insulation length. The

PD activity has been found to be distributed along the tree length [6].

III. RC-MODEL OF AN ELECTRICAL TREE

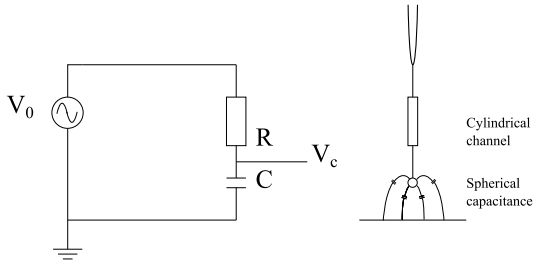


Figure 1. Model for a propagating electrical tree, considered as series connection of a resistive tree channel in series with the capacitive remaining non-treed insulation.

In the following the insulation containing an electric tree is modeled by an RC-equivalent as shown in Figure 1. The tree channel is considered to be a cylinder with radius r and a total channel resistance determined by surface deposits of carbon formed as a result of material degradation. It is connected in series with the capacitance of the non-treed insulation section. For a tree channel with a small radius compared to that of the length of the non-treed insulation it is a good approximation to use the sphere-plate self-capacitance of the tree tip to ground as the capacitance value of the non-treed insulation region. In such cases the value is independent of the non-treed insulation length [6]. With a channel radius of $2 \mu\text{m}$ it is calculated to be $C = 4.9 \cdot 10^{-4}$ pF.

If a voltage V_0 is applied to this RC-circuit the resulting voltage V_c across the capacitive part is given by

$$\frac{V_c}{V_0} = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega RC)^2}} \quad (1)$$

where R is the channel resistance, C is the capacitance over the remaining non-insulation and ω is the angular frequency of the applied voltage.

Figure 2 shows how this voltage ratio will vary with the total tree resistance at different applied frequencies f . Assuming initially that the channel resistance is high the voltage V_c will increase more rapidly at low frequencies when the tree resistance R decreases. It means that at a certain resistance more voltage will be applied across the tree channel at higher frequencies. This implies that the likelihood of partial discharges along an existing tree channel will increase with frequency.

IV. EXPERIMENTAL METHOD

A. Sample Preparation

All tests were performed using moulded samples with dimensions $20 \times 10 \times 2$ mm. By use of specially designed moulds a steel needle with a tip radius $2 \pm 1 \mu\text{m}$ was included during moulding. An hydraulic press equipped with heating elements and water cooling was used, facilitating a cooling rate of about $15 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$. The needle-plate distance was

1.05 ± 0.15 mm, and a thin layer of silver-epoxy (EPO-TEK® E4110) was used as ground electrode.

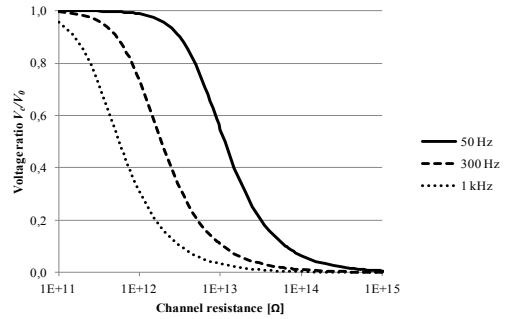


Figure 2. Ratio of voltage at the tree tip, versus total channel resistance at different frequencies of applied voltage

The syndiotactic polypropylene (Finaplas 1471, Total) was first extruded at $200 \text{ }^\circ\text{C}$ and then molded at $180 \text{ }^\circ\text{C}$. Samples of cross-linked polyethylene (LE4201, Borealis) was prepared by first extruding plaques at $117 \text{ }^\circ\text{C}$, which were then molded at $117 \text{ }^\circ\text{C}$ and cross-linked at $170 \text{ }^\circ\text{C}$. Finally the samples were subsequently kept at $90 \text{ }^\circ\text{C}$ for 2 days for mechanical relaxation and removal of the curing by-products.

B. Observation of Electrical Tree Growth

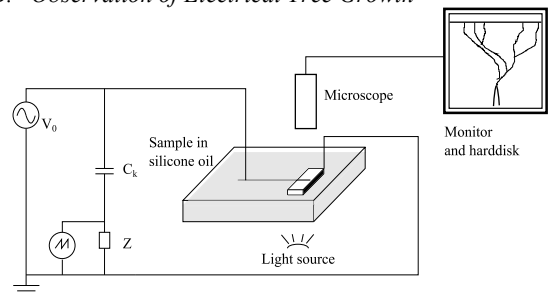


Figure 3. Experimental set-up used for observation of electrical tree growth, and partial discharge detection.

Observation of electrical treeing was performed using the set-up schematically shown in Figure 3. During testing the sample was placed in a glass basin filled with silicone oil to avoid external flashover and provide light transparency. The progression of electrical treeing was observed using shadow technique, with light placed underneath the sample and a digital microscope (Keyence VHX-500K or Nikon AZ100) for video recording of the tree progression.

The tree development was investigated applying 50 Hz AC voltage from 8 to 12 kV and 100 Hz to 1 kHz at 10 kV, using a minimum of 5 samples at each voltage and frequency. For application of 50 Hz AC a 220V/100 kV PD free transformer was used. A high voltage amplifier (TREK PD06035) was used at the other frequencies.

C. Partial Discharge Detection

During testing at 50 Hz the partial discharge activity was detected using a calibrated measuring impedance as shown in Figure 3. This allowed the accumulated signal to be recorded for 30 s intervals by an oscilloscope (Yokogawa

DLM2054). The detection limit was found to be 2 pC, and the maximum amplitude was used for analysis.

V. RESULTS

A. Tree Development and PD Activity at 50 Hz

Results presented in Figure 4 and 5 show that at 50 Hz AC voltage the electrical trees developed differently in s-PP and XLPE.

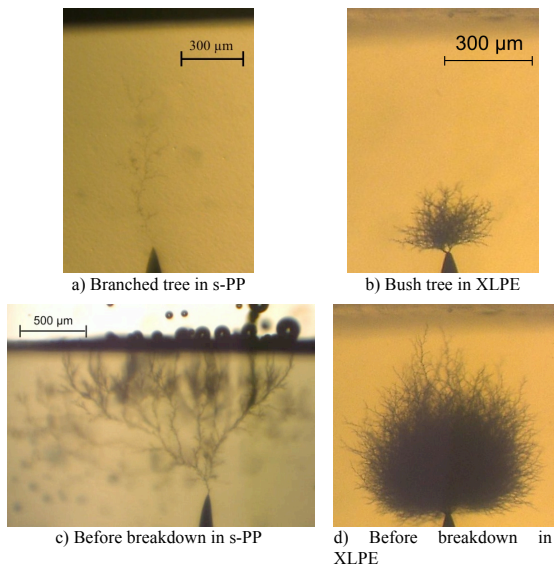


Figure 4 Typical tree propagation in s-PP and XLPE at 50 Hz and 10 kV

In s-PP narrow branched structures developed, as shown in Figure 4a, and grew relatively rapidly towards the opposite electrode. Similar branched tree structures developed at all voltage levels. At 10 kV the average time needed for the first tree branch to reach the ground electrode (TG) was 3 min. Electric breakdown did not, however, occur when the first branch reached the ground electrode. Instead parallel branches continued to develop until the tree width was up to 3 times the length of the trees, as shown in Figure 4c and 5a. Final electric breakdown occurred through a random branch, and the time to breakdown (TBD) varied significantly. The partial discharge magnitudes were typically below the detection limit, except during short periods with maximum apparent charge magnitudes of about 20 pC, as shown in Figure 5a.

In XLPE electrical trees were found to develop in a more stepwise manner, with high and increasing maximum PD magnitudes during the entire growth period. At 10 kV bush trees developed as shown in Figure 4b, which was associated with high partial discharge activity as shown in Figure 5b. Electric breakdown typically occurred immediately after the first tree tip reached the ground electrode. At 10 kV the time to breakdown was similar to that of s-PP, although the PD magnitudes were about 10 times higher. At 8 kV more branched tree structures developed also in XLPE. This resulted in a higher propagation rate and shorter time to breakdown than s-PP at this voltage. At 12 kV the more typical bush type trees

developed, which resulted in a longer time to breakdown than for s-PP.

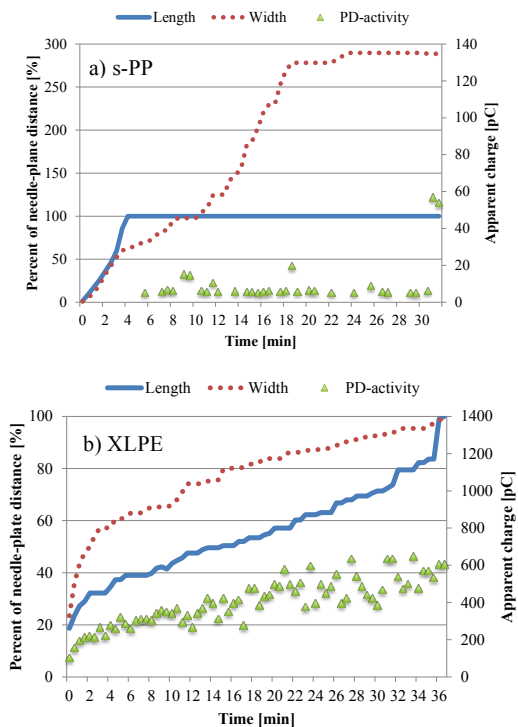


Figure 5 Typical example of length and width development of electric trees and maximum partial discharge magnitudes as a function of time after initiation at 50 Hz for a) s-PP and b) XLPE.

B. Tree Development in s-PP at Higher Frequencies

As shown in Figure 6 the effect of increasing the frequency of the applied voltage was to increase the width and number of tree branches. At the frequency 1 kHz a dense tree structure developed into a spherical shape with branches growing perpendicular and even opposite to the apparent applied electric field direction.

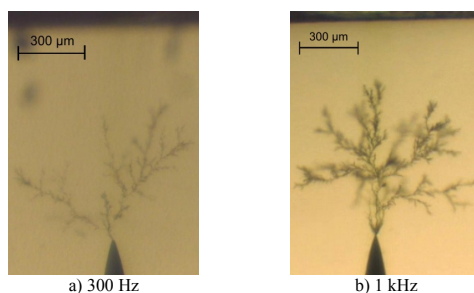


Figure 6 Typical structure of an electrical tree grown at higher frequencies in s-PP

The data presented in Figure 6 shows that the time until the first branch reached the ground electrode (TG) increased with frequency up to about 300 Hz and then decreased with increasing frequency. The same trend was found for time to

breakdown (TBD). These results were reflected by fewer parallel branches growing before breakdown at higher frequencies. The ratio between time to breakdown (TBD) and time to ground (TG) decreased from 5.5 at 50 Hz to 2 at 1 kHz. In addition also the ratio between tree length and width increased from 6 to approximately 1 at 50 Hz and 1 kHz, respectively. The tree shapes and propagation rates were reproducible, but results varied more at 50 Hz than at other frequencies.

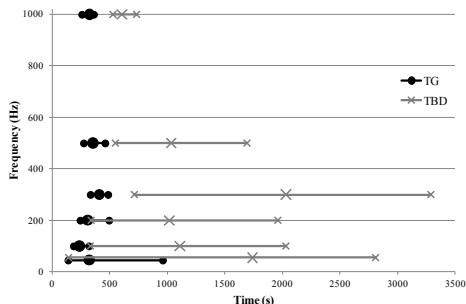


Figure 6 Time until the first branch reaches the ground electrode (TG) and time to electric breakdown (TBD) at different frequencies at 10 kV in samples of s-PP. The average time values, as well as the minimum and maximum value are plotted in a logarithmic time scale.

VI. DISCUSSION

In s-PP tree structures with few, and often only one main tree branch typically developed at all voltage levels. In addition the PD magnitudes were very low compared to that of XLPE samples, minimum 5 times smaller. This may result in low rate of degradation and lower conductivity of the tree structures in s-PP insulation than in XLPE. Several mechanisms may contribute to this difference. It is previously observed high rate of gas formation in tree channels developing in s-PP [8]. Another important difference is that s-PP is a thermoplastic material which may melt in case of a high energy discharge, for example when a branch reaches the ground electrode. Then when the discharge extinguishes the channel surface may recrystallize and rapidly regain its electric breakdown strength. This combined effect of increased gas pressure and surface melting could possibly explain why in s-PP several parallel tree branches had to develop to ground before the resulting channel resistance became sufficiently low for breakdown to occur.

The RC-model presented indicates that the effect of increasing the frequency is to increase the voltage ratio distributed along the tree structure. More partial discharge activity will facilitate formation of tree branches caused by charge injection, local erosion and material degradation. The result will be a wider tree structure more branches and increased capacitance to ground, and even more voltage distributed along the tree channel. Thus at high frequencies it is likely that the PD activity in the tree channels will remain high, until the point when the tree structure becomes so conductive that most of the voltage will be applied across the remaining non-treed insulation. This is in agreement

with the observed stepwise growth rate of trees in XPLE and may explain why the PD activity strongly varied with time during the period of tree growth in both s-PP and XLPE. This model also explains why the width and density of the tree branches was found to increase with increasing frequency.

If assuming that the number of partial discharges is proportional to the number of voltage periods one would expect that the time until the first tree branch reaches the ground electrode (TG) and time to breakdown (TBG) to decrease with increasing frequency. Such a decrease was observed, particularly at frequencies above 300 Hz, but the frequency dependence was less than that expected from the increased number of periods. Instead TG was found to increase linearly with number of periods which passed until the insulation distance was bridged. This strongly indicates the importance of also considering the shape of the trees and the voltage distribution within the tree structure, when discussing the mechanisms of electrical tree formation.

VII. CONCLUSION

The large difference in degree of tree branching and partial discharge activity, in s-PP and XLPE indicates that high degree of branching will be associated with high PD activity.

According to the proposed RC-model it is likely that the degraded treed region of the thermoplastic s-PP has a lower resulting conductive than the treed regions of XLPE.

ACKNOWLEDGEMENTS

The work was partly funded by The Research Council of Norway and several industrial partners, see: <http://www.subseapowersupply.com>

REFERENCES

- [1] Yoshino, K. et al., "Application of a novel polypropylene to the insulation of an electrical power cable", *Electr Eng Jpn*, 2004, vol. 146(1) pp. 872-879
- [2] Kim, D.W. and K. Yoshino "Morphological characteristics and electrical conduction in syndiotactic polypropylene", *J Phys D Appl Phys*, 2000, vol. 33(1), pp. 464-471
- [3] Dissado, L.A. and J.C. Fothergill, "Electrical Degradation and Breakdown in Polymers", IET, 1992
- [4] Varlow, B.R. and D.W. Auckland, "Mechanical aspects of electrical treeing in solid insulation", *IEEE Electr Insul M*, 1996, vol. 12(2), pp. 21-26
- [5] Chen, G. and C.H. Tham, "Electrical treeing characteristics in XLPE power cable insulation in frequency range between 20 and 500 Hz", *IEEE T Dielect El In*, 2009, vol. 1681, pp. 179-188
- [6] Lekner, J., "Capacitance coefficients of two spheres" *J Electrostat*, 2011, vol. 69, pp. 11-14
- [7] Ieta, M. and M. Nawata, "Consideration of treeing in polymers", *IEEE CEIDP*, 1972
- [8] Holto, J. and E. Ildstad, "Electrical tree growth in extruded s-polypropylene" *ICSD*, 2010