

Elektrisk trevekst i kryssbundet polyetylen (PEX) kabelisolasjon ved ulike spenninger og frekvenser

Kristian Fauskanger

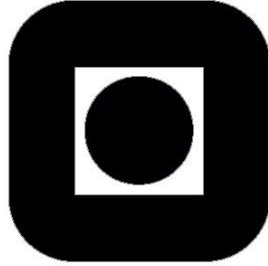
Master i energi og miljø

Innlevert: juni 2013

Hovedveileder: Erling Ildstad, ELKRAFT

Medveileder: Jorunn Hølto, ELKRAFT

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Institutt for elkraftteknikk



DIPLOMOPPGAVE VÅREN 2013

Kandidatens navn: Kristian Fauskanger

Fag: TET4900 Elektrisk energiteknikk

Oppgavens tittel (norsk): Elektrisk trevekst i kryssbundet polyetylen (PEX) kabelisolasjon ved ulike spenninger og frekvenser.

Oppgavens tittel (engelsk): Formation of Electrical trees in Cross-linked Polyethylene (XLPE) cable insulation at different voltage and frequencies

De fleste ekstruderte kraftkabler er i dag isolert med kryssbundet polyetylen (PEX). Et materiale som har gode mekaniske og elektriske egenskaper opp til en maksimal driftstemperatur på ca 90 °C, men som er lite resistent mot partielle utladninger. Det er derfor viktig å unngå hulrom og andre forurensinger, som kan føre til partielle utladninger, elektrisk trevekst og gjennomslag.

Kvalitetskontroll og 50 Hz spenningsprøving av 10-20 km lange polymerisolerte høyspenningskabler er imidlertid en stor utfordring. For å redusere utstyrskostnader ved forhøyet prøvespenning, fortas det i økende grad lavfrekvent (VLF) spenningstesting av lange kabelsystem. Relevansen av slike VLF-tester er dessverre lite undersøkt og evalueringen baserer seg i stor grad på antagelser om at gjennomslagsmekanismene er uavhengige av spenningens frekvens. Resultater fra tidligere undersøkelser av initiering og vekst av elektriske trær tyder på at denne antagelsen ikke er holdbar.

Hovedformålet med denne masteroppgaven er derfor å eksperimentelt undersøke initiering og vekst av elektriske trær i PEX ved ulike spenninger og frekvens.

Opgaven vil gå ut på å:

1. Gi en litteraturoversikt over gjennomslagsmekanismer og dannelsen av elektriske trær i PEX. Det skal spesielt fokuseres på hvordan spenning og frekvens vil kunne innvirke på trærnes form, utladningsaktivitet og vekstrate.
2. Fremstille egnede PEX prøveobjekt med innstøpte nåler samt bygge og utprøve målekrets for eksperimentell undersøkelse av:
 - (a) Initiering og vekst av elektriske trær som funksjon av tid, spenning og frekvens.
 - (b) Sammenhengen mellom partiell utladningsaktivitet og dannelsen av elektriske trær.
3. Foreta eksperimentell kartlegging og sammenligning av elektriske trevekst i prøveobjektene som funksjon av ovenfor nevnte parametre.
4. Drøfte resultatene i lys av litteratur og egne antagelser.

Det detaljerte prøveprogrammet fastlegges i samarbeid med veilederne.

Start: 15. januar 2013

Innlevering: 11. juni 2013

Faglærer: Prof. Erling Ildstad (Erling.Ildstad@elkraft.ntnu.no)

Medveileder: Forsker Jorunn Hølto (Jorunn.Holto@sintef.no)


Forord

Denne masteroppgaven er skrevet ved NTNU våren 2013 og er en videreføring av en prosjektoppgave gjennomført høsten 2012. Oppgaven er en del av et pågående samarbeid mellom NTNU og SINTEF hvor målsetningen er å finne karakteristiske kjennetegn til elektrisk trevekst i kryssbundet polyetylen. I den forbindelse er temaet i denne avhandlingen relatert til utladningsaktivitet og elektrisk trevekst ved lave frekvenser.

Jeg ønsker å takke veilederne mine professor Erling Ildstad og forsker Jorunn Holtø for god hjelp både med den teoretiske og praktiske gjennomføringen. Samtidig vil jeg også takke avdelingsingeniør Bård Almås for hjelp med sikkerheten til laboratorieoppsettet.

Til slutt vil jeg takke samboeren min Maja Røv Thomasgård for oppmuntring og støtte gjennom hele prosessen.

Trondheim juni 2013



Kristian Fauskanger

Sammendrag

Tilstandskontroll og feiltester av høyspentkomponenter har de senere årene vist seg som nyttige hjelpemidler for å unngå uønskede utkoblinger. Blant moderne kabelisolasjon har særlig lavfrekvent testing av dielektriske tap ned mot 0,02 Hz blitt mer aktuelt grunnet lavere utstyrskostnader sammenlignet med 50 Hz spenningsprøving. En av de vanligste årsakene for feil i polymeriserte kabler er utladningsaktivitet og akkumulering av elektriske trær. Imidlertid er det fortsatt uklart hvordan målinger ved så lav frekvens kan korreleres med 50 Hz siden flere av feilmekanismene ikke har signifikante dielektriske tap ved så lav frekvens.

Hensikten med denne rapporten har derfor vært å undersøke hvordan elektrisk trevekst og partielle utladninger i kryssbundet polyetylen (PEX) forandrer seg som funksjon av spenning og frekvens. Testobjektene bestod av stålnåler som var støpt inn i 2 mm tykke prøver av PEX hvor avstanden mellom nålspiss og jordelektrode var 1,1 mm. Hvordan treveksten utviklet seg og så ut ved havari ble undersøkt ved hjelp av optisk- og elektronmikroskopiske teknikker. Prøvene ble testet i frekvensområdet 0,1-50 Hz ved 14 kV_{rms} og for 10-20 kV_{rms} ved 50 Hz.

Resultatene har blitt sammenlignet med en teoretisk modell om spennings- og frekvensavhengig trevekst. Forsøkene indikerte at når spenningen ble holdt konstant økte vekstraten proporsjonalt med frekvensen mellom 0,1 og 5,0 Hz. Ytterligere økning av frekvensen medførte en strukturforandring fra grenvekst til buskvekst som igjen påvirket vekstraten til å synke ved økt frekvens. Når frekvensen ble holdt konstant 50 Hz og spenningen justert mellom 10 og 20 kV_{rms}, viste resultatene at vekstraten kun økte lineært med spenningen innledningsvis. Samtidig viste det seg at amplitudeverdien til utladningene økte med tiden ved grenvekst mens det for tett buskvekst ble registrert et stabilt forløp.

Analysen fra elektronmikroskopet viste at tettheten av trekanaler er større ved buskvekst enn grenvekst. For en typisk prøve med grenvekst ble det registrert en avstand på 10 μm mellom kanalene, mens kanalene for buskvekst i mange tilfeller kan vokse sammen på kryss og tvers.

Abstract

Diagnostic tests of high voltage equipment have during the last couple of years become a useful tool in order to prevent unwanted failures. Among modern cable insulation low frequency testing (VLF) has proved to be useful due to its lower equipment costs compared with ordinary 50 Hz voltage testing. One of the most common errors regarding polymer insulation are partial discharges and accumulation of electrical trees. However it is unclear how VLF measurements correspond to power frequency because a vast majority of defects in solid insulation do not have significant dielectric losses during low frequency.

The aim of this report has been to analyze how electrical treeing and partial discharges in cross-linked polyethylene (XLPE) change as a function of applied voltage and frequency. All the test objects consisted of steel needles molded into 2 mm thick samples of XLPE with a distance between needle tip and ground of 1,1 mm. How the electrical trees developed and looked like during breakdown was explored with both optical and electron microscopy. The samples were tested in the range of 0.1-50 Hz at 14 kV_{rms} and between 10 and 20 kV_{rms} at 50 Hz.

The results have been compared with a theoretical model concerning voltage and frequency dependent treeing. The tests indicated that growth rate increased proportionally with applied frequency between 0,1 and 5,0 Hz when applied voltage was held constant 14 kV_{rms}. Further increase of the frequency caused a structural change from branch to bushlike shape which again led to a non-linear decrease in growth rate. When the frequency was held to 50 Hz and the voltage adjusted between 10 and 20 kV_{rms}, the results indicated that growth rate only initially increased linearly. During branch development the crest value of the discharges increased with time while it remained nearly constant when bush shapes occurred.

Observations from the electron microscope showed that the density of tree channels was larger during bush shapes compared with ordinary branching. A typical sample of branching had a distance of 10 μm between the channels while the channels during bushing often grew together and formed connected channels.

Innhold

1	Innledning	1
1.1	Bakgrunn	1
1.2	Arbeid	2
2	Teori	3
2.1	Partielle utladninger	3
2.2	Elektrisk trevekst	5
2.2.1	Trevekstens utvikling	5
2.2.2	Struktur	7
2.2.3	Frekvens- og spenningsavhengighet	9
3	Metode	11
3.1	Prøveobjekt	11
3.2	Målekrets	14
3.3	Analyse	17
3.3.1	Elektrisk trevekst	17
3.3.2	Partielle utladninger	19
4	Resultater	20
4.1	Elektrisk trevekst	20
4.1.1	Lengde- og breddeutvikling	20
4.1.2	Vekstrate	25
4.1.3	Tidsmålinger	30
4.1.4	Form	33
4.2	Partielle utladninger	35
4.2.1	Amplitudeverdier	35
4.2.2	Faseforløp	37
5	Diskusjon	39
6	Konklusjon	45
A	Trevekst	50
A.1	Lengdeutvikling	50
A.2	Breddeutvikling	55
A.3	Vekstfaktor	60
B	Utladningsaktivitet	64
B.1	Utvikling	64
B.2	Faseplot	66
C	Matlab	68

Figurer

1.1	RC-krets	2
2.1	Krets for detektering av PD	4
2.2	Typiske skjermbilder av utladninger	4
2.3	Paschen-kurven [7]	6
2.4	Gren- og buskvekst	7
2.5	Lengdeutvikling som funksjon av tid [9]	8
2.6	Vekstfaktor [bredde/lengde] som funksjon av tid [9]	8
2.7	Spenningsforhold over trekanalen som funksjon av total treresistans R ved 0.1, 10 og 50 Hz [14]	10
3.1	Støpeform	13
3.2	Testobjekt	14
3.3	Koblings skjema	15
3.4	Mål av bredde og lengde	18
3.5	Omicron målesystem	19
4.1	Typisk lengdeutvikling for ulike frekvenser ved 14 kV	20
4.2	Typisk lengdeutvikling ved ulike frekvenser	21
4.3	Typisk lengdeutvikling for 50 Hz ved 10, 14 og 20 kV	21
4.4	Typisk breddeutvikling for ulike frekvenser ved 14 kV	22
4.5	Typisk breddeutvikling for 50 Hz ved 10, 14 og 20 kV	22
4.6	Gjennomsnittlig vekstfaktor ved 14 kV for 0,1, 1,0 og 50 Hz	23
4.7	Gjennomsnittlig vekstfaktor ved 14 kV for 0,5, 1,0, 5,0 og 10 Hz	24
4.8	Gjennomsnittlig vekstfaktor for 50 Hz ved 10, 14 og 20 kV	24
4.9	Vekstrate i lengderetning 0-20 % for ulike frekvenser ved 14 kV	25
4.10	Initiell vekstrate i lengderetning for ulike spenningsnivå ved 50 Hz	26
4.11	Vekstrate i lengderetning 20-70 % for ulike frekvenser ved 14 kV	26
4.12	Vekstrate i lengderetning 20-70 % for ulike spenningsnivå ved 50 Hz	27
4.13	Vekstrate i lengderetning 70-100 % for ulike frekvenser ved 14 kV	28
4.14	Vekstrate i lengderetning 70-100 % for ulike spenningsnivå ved 50 Hz	29
4.15	Initieringstid for 14 kV ved ulik frekvenspåtrykk	30
4.16	Initieringstid for ulike spenninger ved 50 Hz	31

4.17 Tid til sammenbrudd fra initiering for 14 kV ved ulik frekvenspåtrykk	31
4.18 Tid til sammenbrudd fra initiering for ulike spenninger ved 50 Hz	32
4.19 Fordeling av trekanaler ved 0,1 Hz	33
4.20 Fordeling av trekanaler ved 10 Hz	34
4.21 Fordeling av trekanaler ved 50 Hz	34
4.22 PD-utvikling ved 14 kV 0,5 Hz	35
4.23 PD-utvikling ved 14 kV 10 Hz	36
4.24 PD-utvikling ved 14 kV 50 Hz	36
4.25 Faseplot ved 14 kV 10 Hz	37
4.26 Faseplot ved 50 Hz	38
A.1 Lengdeutvikling ved 14 kV 0,1 Hz	50
A.2 Lengdeutvikling ved 14 kV 0,5 Hz	51
A.3 Lengdeutvikling ved 14 kV 1,0 Hz	51
A.4 Lengdeutvikling ved 14 kV 5,0 Hz	52
A.5 Lengdeutvikling ved 14 kV 10 Hz	52
A.6 Lengdeutvikling ved 14 kV 50 Hz	53
A.7 Lengdeutvikling ved 10 kV 50 Hz	53
A.8 Lengdeutvikling ved 20 kV 50 Hz	54
A.9 Breddeutvikling ved 14 kV 0,1 Hz	55
A.10 Breddeutvikling ved 14 kV 0,5 Hz	55
A.11 Breddeutvikling ved 14 kV 1 Hz	56
A.12 Breddeutvikling ved 14 kV 5 Hz	56
A.13 Breddeutvikling ved 14 kV 10 Hz	57
A.14 Breddeutvikling ved 14 kV 50 Hz	57
A.15 Typisk breddeutvikling ved 14 kV	58
A.16 Breddeutvikling ved 10 kV 50 Hz	58
A.17 Breddeutvikling ved 20 kV 50 Hz	59
A.18 Vekstfaktor 14 kV 0,1 Hz	60
A.19 Vekstfaktor 14 kV 0,5 Hz	60
A.20 Vekstfaktor 14 kV 1,0 Hz	61
A.21 Vekstfaktor 14 kV 5,0 Hz	61
A.22 Vekstfaktor 14 kV 10 Hz	62
A.23 Vekstfaktor 14 kV 50 Hz	62
A.24 Vekstfaktor 10 kV 50 Hz	63
A.25 Vekstfaktor 20 kV 50 Hz	63
B.1 PD-utvikling 14 kV 0,1 Hz	64
B.2 PD-utvikling 14 kV 1,0 Hz	65
B.3 Faseplot 14 kV 0,1 Hz	66
B.4 Faseplot 14 kV 1,0 Hz	67

Kapittel 1

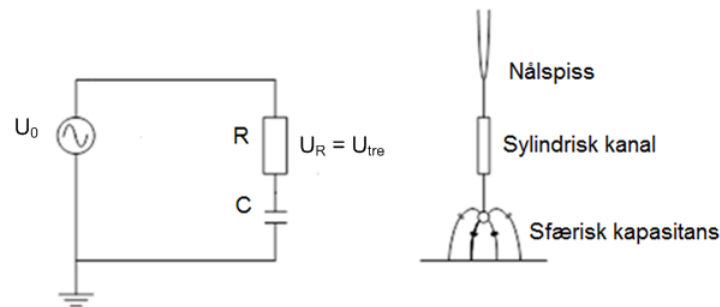
Innledning

1.1 Bakgrunn

Tilstandskontroll og vedlikehold av høyspentkomponenter har utviklet seg kraftig siden førstegenerasjons komponenter ble innført. Mens de ulike delene tidligere ble skiftet ut når havariet allerede hadde funnet sted, finnes i dag både overvåkingssystem, utskiftingsrutiner og feiltester som gjør det enklere å forhindre uønskede utkoblinger og sørger for vesentlig bedre forsyningssikkerhet. Blant moderne kabelisolasjon dominerer kryssbundet polyetylen (PEX). Dette skyldes PEX sine gode mekaniske og dielektriske egenskaper sammenlignet med andre medier opp til en driftstemperatur på 90 °C. Imidlertid har PEX-isolerte høyspentkabler vist seg sårbar for utladningsaktivitet og elektrisk trevekst, og kvalitetskontroll av slike kabler har derfor blitt et stadig mer aktuelt tema. Særlig har spenningstesting ned mot 0,02 Hz blitt tatt i bruk de siste årene grunnet lavere utstyrskostnader sammenlignet med 50 Hz spenningsprøving. Hvordan resultatene ved så lav frekvens kan korreleres med 50 Hz er derimot basert på antagelser om at gjennomslagsmekanismene er uavhengig spenningens frekvens, mens forsøk fra tidligere studier viser noe annet. Elektrisk trevekst bærer preg av en ulineær vekstkarakteristikk, og gode kunnskaper om hvordan påtrykt spenning og frekvens er med å påvirke utviklingen er derfor avgjørende for å trekke riktige konklusjoner ved lavfrekvent testing.

1.2 Arbeid

Elektriske trevekst kan oppstå i områder med forsterket elektrisk felt. Dette ble framprovosert ved å benytte egenproduserte testobjekt med innstøpt nål. For å kunne gjennomføre flere like forsøk og dermed antyde en tendens, har det blitt benyttet et tradisjonelt nål-plan oppsett vist i figur 1.1. Her er trekanalen representert med en motstand R mens isolasjonen mellom trespiss og jordelektrode er vist som en kapasitans C .



Figur 1.1: RC-krets

I denne oppgaven har det blitt valgt å undersøke elektrisk trevekst i PEX i frekvensområdet 0,1-50 Hz ved 14 kV_{rms} påtrykk samt $10\text{-}20 \text{ kV}_{rms}$ ved 50 Hz. Siden utladningsaktivitet er nært beslektet med trevekst, har også amplitudeverdier og mønster til utladningene blitt registrert. Arbeidet er en videreføring av et forprosjekt gjennomført høsten 2012 med tittelen *Partielle utladninger og elektrisk trevekst i ekstrudert polyetylen (PEX) kabelisolasjon ved lave frekvenser* hvor det ble forsøkt å designe et lavpassfilter for å dempe støyen fra høyspenningsforsterkeren i tillegg til at ferdige kabelobjekter med innpresset nål ble undersøkt i frekvensområdet 0,1-10 Hz.

Rapporten er i korte trekk delt inn i tre deler med litteraturstudie, metode og resultatoppfølging. Resultatene fra denne masteroppgaven vil også bli presentert i artikkelen *Electric Treeing from needle implants in XLPE during Very Low Frequency (VLF) voltage testing* som skal legges fram på ICSD (International Conference on Solid Dielectrics) i Bologna juli 2013.

Kapittel 2

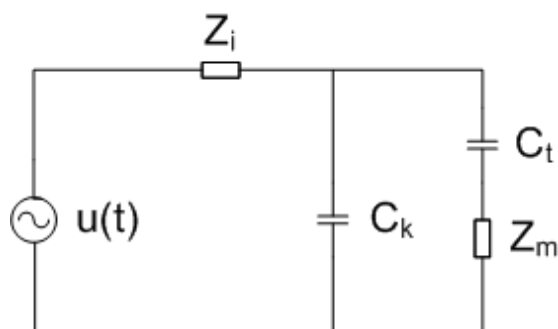
Teori

2.1 Partielle utladninger

Partielle utladninger (PD) er lokale dielektriske sammenbrudd mellom to elektroder i et isolerende medium [1]. Utladningene opptrer stokastisk, varer bare i noen få ns og kan forekomme på steder med forsterket elektrisk felt i forhold til resten av isolasjonen. Slike feltforsterkede områder kan blant annet være hulrom fylt av gass eller væske, grenseflaten mellom to ulike dielektrikum, skarpe kanter eller ledende forurensende partikler [2]. Felles for alle områdene er at de bidrar til ujevn isolasjon og dannelse av hulrom. Utladninger oppstår dersom den elektriske feltstyrken i et hulrom overgår holdfastheten til gassen i hulrommet. Når og ved hvilken spenning utladninger forekommer er derimot avhengig av størrelsen og utformingen av hulrommet. PD i fri luft karakteriseres som eksterne utladninger eller corona mens PD som oppstår inne i isolasjonen betegnes som interne utladninger [3]. PD langs grenseflater kalles overflateutladninger. Polymerisert kabelisolasjon har vist seg sårbar for interne utladninger da dette fører til elektrisk ledende kanaler som til slutt ender i gjennomslag mellom leder og jord.

Detektering av PD

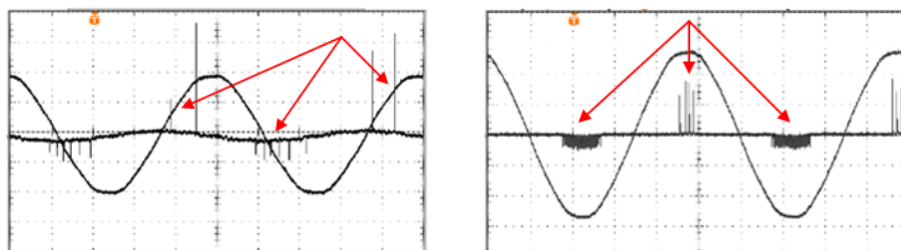
Både akustiske og elektriske målemetoder blir benyttet for å påvise eventuell utladningsaktivitet. Ved bruk av elektriske målemetoder er det vanlig å benytte seg av et oppsett vist i figur 2.1. Her representerer C_k en koblingskondensator mens C_t er testobjektet. Videre er Z_m en måleimpedans mens spenningskilden er representert med sin Theveninekvivalent. Dersom $C_k \gg C_t$, vil koblingskondensatoren i øyeblikket det skjer en utladning kompensere for spenningsfallet over prøveobjektet ved å tilføre en ladning. Denne overførte ladningen kalles en tilsynelatende ladning og blir brukt som mål for størrelsen til utladningen i hulrommet [1].



Figur 2.1: Krets for detektering av PD

Mønster

Det har vist seg at de ulike utladningstypene forekommer på bestemte plasser langs sinuskurven til påsatt spenning [3]. Karakteristisk for interne utladninger er at PD-pulsene oppstår i negativ halvperiode ved synkende spenning og i positiv halvperiode ved stigende spenning. Overflateladninger har et lignende mønster, men har kortere varighet i den forstand at de forsvinner rett etter at spenningen når ± 1 pu. Corona skiller seg mer ut ved at de oppstår kun når spenningen er på topp eller bunn.



(a) Interne utladninger

(b) Corona

Figur 2.2: Typiske skjermbilder av utladninger

Figur 2.2 illustrerer typiske skjermbilder på henholdsvis interne utladninger og corona. De røde pilene peker på utladningene. I figuren for interne utladninger forekommer utladningene med variabel størrelse både når spenningen synker og øker. Figur 2.2b synliggjør at utladningene bare forekommer når spenningen enten er på topp eller bunn.

2.2 Elektrisk trevekst

En av de vanligste aldringsmekanismene i moderne kabelisolasjon er akkumulering av tynne, trelignende ledende kanaler kalt elektriske trær. Trærne er typisk 1-10 μm i diameter og vil til slutt føre til en sammenhengende kanal mellom høyspentelektroden og jord. Veksten vil forekomme i retning av det påtryktet feltet og kan oppstå i områder med lokal feltforsterkning.

2.2.1 Trevekstens utvikling

Elektrisk trevekst er et stokastisk fenomen som vanskelig lar seg beskrive av matematiske modeller. For å gi en nærmere forklaring på hvordan treveksten utvikler seg, er det vanlig å benytte kvalitative modeller og dele prosessen inn i tre faser. Densley [5] introduserte initiering- og vekstfasen, men i senere tid har også gjennomslagsfasen blitt kategorisert.

Initiering

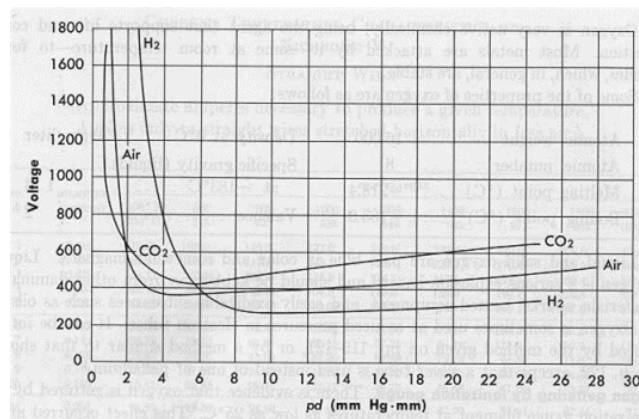
En forutsetning for initiering av elektrisk trevekst er partielle utladninger. Disse utladningene fører til romladningsinjeksjon og elektronskred [2] som igjen vil føre til ulik degradering av materialet. Cho [6] har foreslått tre mulige nedbrytningsmekanismer i PEX.

- Når interne utladninger forekommer, vil det produseres ioner som akselereres under det høye påtrykte feltet. Dette fører til sjokkbølger som igjen fører til at molekylstrukturen brytes opp.
- Utladningsaktiviteten gjør at det dannes gasser med høy temperatur. Da vil også temperaturen i isolasjonen øke, som igjen vil føre til at deler av isolasjonen etter hvert vil smelte.
- Biprodukter dannes av de induserte molekylene og isolasjonen vil oksidere. Oksidasjonen vil føre til at isolasjonens dielektriske egenskaper reduseres.

I tillegg nevner Densley [5] at Maxwellkrefter påfører så stor mekanisk belastning at isolasjonen til slutt danner sprekker. Hvilken av de nevnte nedbrytningsmekanismene som best beskriver initieringen er avhengig av blant annet type materiale, graden av urenheter og mekanisk påkjenning, men det antas likevel at mekanismene både kan opptre alene eller sammen slik at treveksten oppstår.

Vekst

Under denne fasen er det i hovedsak energien fra de partielle utladningene som driver veksten. PD-aktiviteten fører til en karbonisering hvor hydrokarbonene i polymeren blir spaltet til hydrogen og karbon samt små mengder andre gasser. Karbonet vil legge seg langs hulrommene og sørge for at kanalene blir ledende mens interne trykkvariasjoner fører til at treveksten starter og stopper uregelmessig. Videre vil holdfastheten til gassene som spaltes være ulik og påvirker hvor stor spenning som trengs for at PD skal opptre. Paschen-kurven i figur 2.3 viser holdfastheten som funksjon av produktet mellom gasstrykk og elektrodeavstand. Av figuren kan det observeres at ved både å øke eller minke produktet rundt minimumspunktet vil føre til en økt sammenbruddsspenning. Dette betyr at selv om avstanden mellom elektrodene er under 1 cm, så er gjennomslagsspenningen også avhengig av hvilket gasstrykk som er tilstede.



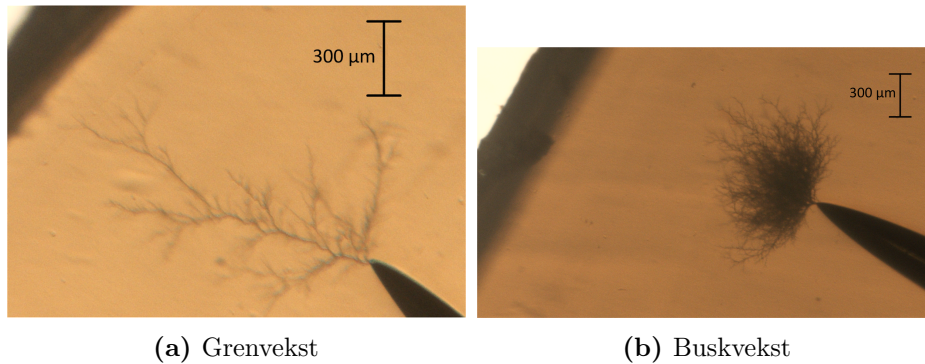
Figur 2.3: Paschen-kurven [7]

Gjennomslag

Når den elektriske feltstyrken overgår holdfastheten til den resterende isolasjonen, vil det oppstå kortslutning mellom høyspentelektroden og jord. Gjennomslag kjennetegnes av en tydelig kanal flere ganger tykkere enn trekanalene samt en kraftig kortslutningsstrøm. Studier av PEX gjort av Chen [8] viser at gjennomslag som oftest skjer når den første trekanalen når jord.

2.2.2 Struktur

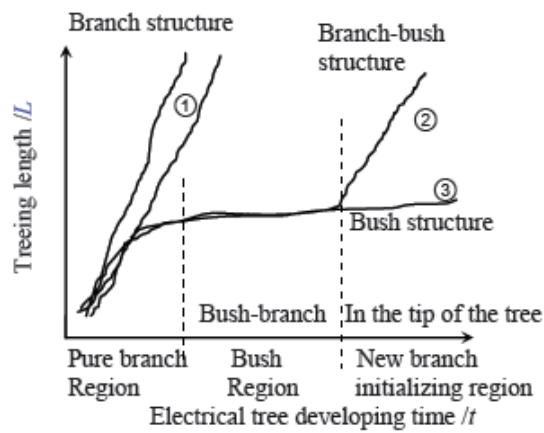
Det finnes flere måter et elektrisk tre kan vokse på. Bakgrunnen til dette avhenger av påtrykt spenning og frekvens, men også isolasjonsmaterialets tilstand. Urenheter, grad av krystalitt, viskoelastiske egenskaper og elastisitetsmodul [11] er også alle mulige faktorer som kan påvirke treveksten. I PEX har trærne i hovedsak en form som ligner buskvekst eller grenvekst.



Figur 2.4: Gren- og buskvekst

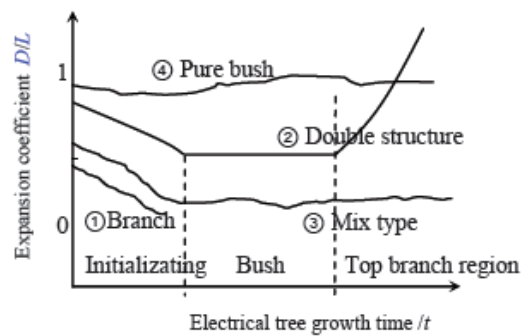
Figur 2.4 illustrerer et typisk utseende for gren- og buskvekst. Som vist i figur 2.4a er det en tydelig hovedgren med et par utstikkere. Det har blitt observert både bred og enkel grenvekst. Gjennomslag vil som oftest skje idet hovedgrenen når jordelektroden. Derimot viser figur 2.4b mange avgreininger som vokser sammen. Karakteristisk for en slik utvikling er en sakte utvikling i lengderetning før en enkel gren bryter løs fra busken og vokser mot jordelektroden når trekanalene nærmer seg jordplanet. Det har også blitt påvist en blanding av gren- og buskvekst kalt dobbeltstruktur [8].

Zheng [9] har gjort grundige undersøkelser for å beskrive hvordan de ulike trestrukturene utvikler seg over tid. Figur 2.5 viser lengdeutviklingen til de tre forskjellige karakteristikkene. En ordinær grenstruktur har en jevn vekstrate mens buskvekst har en høy vekstrate innledningsvis før den flater ut. Dobbeltstrukturen ligner på buskveksten bortsett fra at vekstraten øker mot slutten.



Figur 2.5: Lengdeutvikling som funksjon av tid [9]

Figur 2.6 viser hvordan forholdet mellom bredde og lengde kan utvikle seg over tid. Ren buskvekst har et forhold > 1 , mens gren- og dobbeltstruktur har et forhold < 1 .



Figur 2.6: Vekstfaktor [bredde/lengde] som funksjon av tid [9]

2.2.3 Frekvens- og spenningsavhengighet

Tidligere studier

Flere studier har blitt gjennomført for å kartlegge hvordan trevekst i PEX varierer med påtrykt spenning og frekvens [8, 10, 12, 13]. Felles for de ulike rapportene er at vekstrate, tid til sammenbrudd og fasong alle varierer med påtrykket. Blant annet konkluderte Ytterstad [10] at det ved 12 kV 0,1 Hz forekom enkel trevekst mens det ved 12 kV 50 Hz oppstod buskstruktur. Chen [13] erfarte at det for påtrykk over 11 kV 50 Hz kun oppstod buskvekst mens det ved lavere spenninger oppstod bred og enkel grenvekst. I samme rapport ble det også funnet at vekstraten sank fra 34 til 14 $\mu\text{m}/\text{min}$ mellom 9 og 15 kV før den steg helt til 1726 $\mu\text{m}/\text{min}$ mellom 15 og 27 kV.

Energi i partielle utladninger

En mulig forklaring på hvorfor treveksten er så avhengig av påtrykket ligger i energien til de partielle utladningene. Ved å anta n like store utladninger hver halvperiode, er effekt dissipert P lik [14]:

$$P = n\sqrt{2}q_a U_0 f \quad (2.1)$$

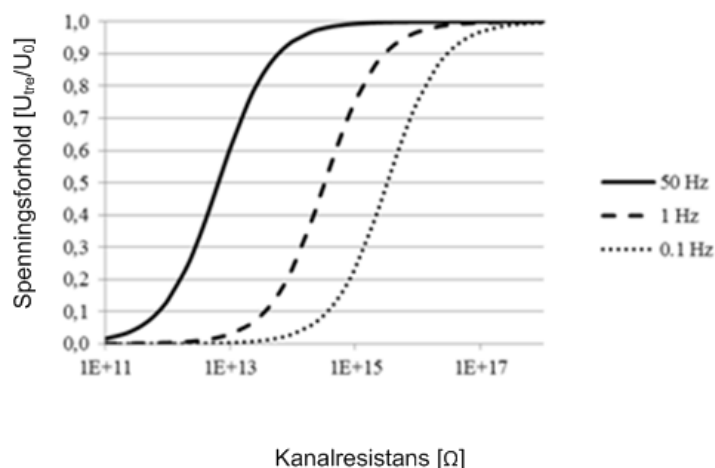
hvor q_a er amplituden til tilsynelatende ladning, U_0 er påtrykt spenning ved pd-dannelse og f er påtrykt frekvens. Videre antas det at antall utladninger er proporsjonal med forholdet mellom total spenning påtrykt langs trekanalen U_{tre} og spenningsfallet ved hver utladning ΔU_{pd} . Ved å benytte en proporsjonalitetsfaktor K som er avhengig av geometrien til hulrommet kan antall utladninger per halvperiode uttrykkes ved:

$$n = K \frac{U_{tre}}{\Delta U_{pd}} \quad (2.2)$$

For et RC-oppsatt som vist i figur 1.1 vil forholdet mellom spenningen over trekanalen U_{tre} og påtrykt spenning U_0 være:

$$\frac{U_{tre}}{U_0} = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{1}{(2\pi f RC)^2}}} = A(f) \quad (2.3)$$

Dersom trekanalen har en liten radius sammenlignet med avstanden mellom kanaltuppen og jordelektroden, er det rimelig å anta at kapasitansen er konstant [14]. Med en kanalradius lik $2 \mu\text{m}$ er denne kapasitansen C funnet til å være $4.9 \cdot 10^{-4} \text{ pF}$.



Figur 2.7: Spenningsforhold over trekanalen som funksjon av total tre-resistans R ved 0.1, 10 og 50 Hz [14]

Figur 2.7 viser at spenningen over trekanalen er høyere for 50 Hz enn ved 1.0 og 0.1 Hz ved motstandsverdier mellom $10^{11}\Omega$ og $10^{17}\Omega$. Dette indikerer igjen at sannsynligheten for partielle utladninger langs en eksisterende trekanal vil reduseres med synkende frekvens.

Spenningsavhengigheten kan forklares ved å kombinere (2.1), (2.2) og (2.3) til følgende likning:

$$P_{tot} = K' q_a A(f) U_0^2 f \quad (2.4)$$

hvor K' er en kombinert tre- og hulromsgeometrisk faktor. Av (2.4) ser man at total dissipert effekt er forventet å øke proporsjonalt med kvadratet til påtrykt spenning, amplitudeverdien til tilsynelatende ladning og frekvens. Siden treveksten drives av de partielle utladningene, som beskrevet i kapittel 2.2.1, antas vekstraten å være proporsjonal med effekten fra utladningene i kanalene [15]. Dermed kan vi av (2.4) også forvente at vekstraten er proporsjonal med de nevnte parameterne.

Kapittel 3

Metode

3.1 Prøveobjekt

Elektrisk trevekst i polymerisert høyspenningsisolasjon kan som kjent forekomme dersom det oppstår en lokal feltforsterkning. For å framprovosere dette, ble det benyttet en nål-platekonfigurasjon bestående av en akupunktur nål, PEX-isolasjon og påmalt jordelektrode av sølvepoxy. I forhold til hva som ble gjort i høstprosjektet [17] hvor det ble brukt ferdig isolasjon fra en kommersiell kabel, ble prøveobjektene nå framstilt av egenprodusert isolasjon. Fordelene med å bruke egenproduserte prøveobjekt er at avstanden mellom nålspiss og jordelektrode i større grad kan kontrolleres og dermed oppnå like prøveobjekt. På den andre siden innebærer dette tidkrevende operasjoner som ekstrudering og støping. Ved å benytte eksisterende isolasjon unngår en disse operasjonene, men å oppnå korrekt avstand mellom nål og jord er vanskelig om nåla skal presses inn i ferdig isolasjon. Avstanden mellom nålspissen og jordelektroden ble satt til å være $1100 \pm 100 \mu\text{m}$.

Nål

Det ble benyttet akupunktur nåler med radius $3 \pm 1 \mu\text{m}$ av fjærstål. I forkant av støpingen ble lengden og radien på alle nålene målt opp og kontrollert ved et mikroskop. Omtrent 5 % av nålene oppfylte ikke kravene om radien og ble forkastet. Lengden på nålene ble målt for å senere sikre at avstanden mellom nålspissen og jordelektroden befant seg innenfor det bestemt intervallet.

Isolasjon

Isolasjonen til prøveobjektene var av PEX (LS4201S). Denne ble først ekstrudert på rull fra pellets før selve støpeprosessen og kryssbindingen ble gjennomført. Til hvert prøveobjekt ble det brukt 0,3 g isolasjonsmateriale.

Jordelektrode

Som jordelektrode ble det malt på en sølvfylt epoksy (EPO-TEK E4110). Denne sølvepoksyen måtte først blandes sammen av en sølvpasta og en herdevæske av polyoxypropylendiamin. I henhold til databladet skulle det være det være ti ganger så mye sølvpasta som væske målt i vekt. Oppgitt i databladet var også massetettheten til de to komponentene.

$$\begin{aligned}\rho_{\text{sølvpasta}} &= 3,10 \text{ kg/dm}^3 = 3100 \text{ g/dm}^3 \\ \rho_{\text{herdevæske}} &= 0,95 \text{ kg/dm}^3 = 950 \text{ g/dm}^3\end{aligned}$$

Det ble malt på 20 prøver om gangen. For 20 prøver holdt det med 1,0 g sølvpasta. Til dette trengtes det da 0,1 g herdevæske eller 105 μl som vist under

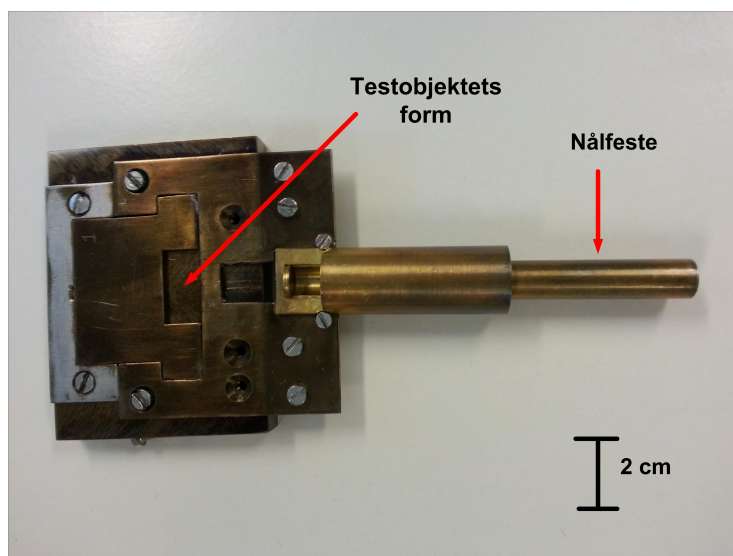
$$\frac{0,1 \text{ g}}{950 \frac{\text{g}}{\text{dm}^3}} = 1,05 \cdot 10^{-4} \text{ dm}^3 = 1,05 \cdot 10^{-4} \text{ l} = 105 \mu\text{l} \quad (3.1)$$

I tillegg ble en bit aluminiumsfolie festet til sølvepoksyen slik at krokodilleklemmer senere kunne festes på prøveobjektene.

Produksjon

Det var viktig at det ikke befant seg urenheter på isolasjonen eller støpeformene. Dette skyldes at støvpartikler kunne føre til uønskede lokale feltforsterkninger på prøveobjektene ved spenningspåtrykk. Videre var det også et poeng at testobjektene skulle være så like som mulig for å få et godt sammenligningsgrunnlag ved senere analyse. Før hvert prøveobjekt skulle framstilles ble derfor støpeformen og nåla rengjort med støvfritt papir og isopropanol i et avtrekksskap. Det var fire tilgjengelige støpeformer, men de var alle litt ulike i lengden. For at avstanden mellom nålspissen og jord skulle være som ønsket, ble derfor støpeformene kompensert med tynne messingringer.

Støpeformene er illustrert i figur 3.1 og har tidligere blitt utarbeidet på NTNU. Størrelsen på testobjektene var 20 mm · 10 mm · 2 mm. Akupunktturnåla ble festet til en bevegelig enhet og ført inn akkurat til starten av isolasjonen. Når nødvendig mengde isolasjon var veid opp og plassert i forma, ble det lagt på en 0,2 mm tynn plate av teflon og et 1 cm tykt lokk av messing som dekte isolasjonen og området rundt. Teflonplaten ble lagt på for at ikke den ferdigstøpte isolasjonen skulle feste seg til lokket.



Figur 3.1: Støpeform

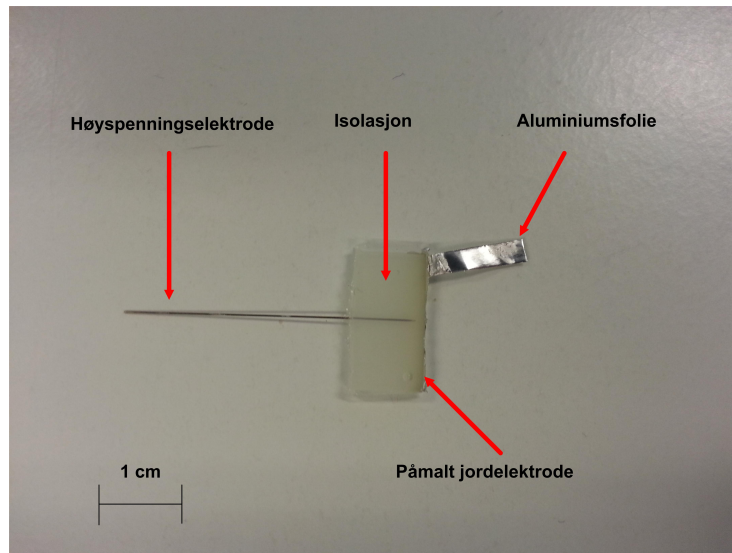
Pressa som ble brukt til støping var av typen Genesis Wabash. Prosessen bestod av flere deloppgaver som å presse ved ulike temperaturer, nedkjøling og lufttørking. Siden stål har høyere varmekapasitet enn PEX, ble nåla kjølt ned hurtigere enn isolasjonen. Dette førte også til at isolasjonen nærmest nåla ble avkjølt raskere enn isolasjonen ellers i testobjektet. På grunn av dette oppstod det mekaniske spenninger i isolasjonen som senere kunne påvirke treveksten. Tabell 3.1 oppsummerer støpeprosessen som tok 1,5 timer per gjennomkjøring inkludert oppvarming av pressa. Det ble støpt to testobjekt per gjennomkjøring.

Tabell 3.1: Innstillinger for pressa

Tid [min]	Temperatur [°C]	Trykk [bar]	Beskrivelse
0	115	3	Støping starter
7	115	3	Nåla presses helt inn
8	175	12	Temperatur og trykk økes
53	-	12	Vannavkjøling 15°C/min
63	-	-	Luftkjøling
64	-	-	Støping ferdig

Etter at støpingen var ferdig ble testobjektet varsomt tatt ut fra formen for å unngå at nåla trakk seg ut. Omtrent en tredjedel av prøveobjektene hadde så mange luftbobler i seg etter støping at de måtte forkastes. Deretter ble testobjektene kontrollert i et mikroskop for eventuelle støvpartikler eller om nåla hadde trukket seg litt tilbake og etterlatt et luftrom. Den sølvfylte epoksyen ble så malt på som jordelektrode sam-

men med en bit aluminiumsfolie. Siste del i prosessen var å plassere prøveobjektene i et varmeskap på 90°C over to døgn. Dette ble gjort for å redusere de mekaniske spenningene i isolasjonen og for at jordelektroden skulle størkne. Et ferdig prøveobjektet er vist i figur 3.2.



Figur 3.2: Testobjekt

3.2 Målekrets

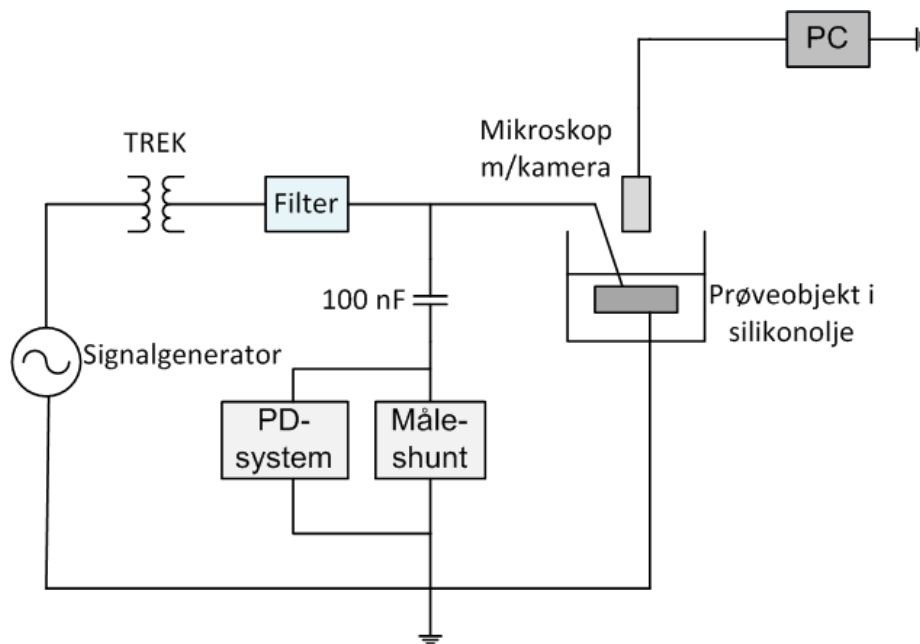
Utstyr

Foruten ledninger og krokodilleklemmer ble følgende hovedkomponenter brukt i forsøkene

- Signalgenerator: TORMATIC Model 3026
- Høyspenningsforsterker: TREK Model 90622 IX
- Mikroskop m/kamera: Nikon Model C-DSD230
- PD-system: Omicron Model MPD 500

Oppkobling

Ønsket frekvens- og spenningspåtrykk ble regulert gjennom en signalgenerator og en høyspenningsforsterker. Ut fra forsterkeren ble strømledningen lagt oppå en treplanke 2 meter over målecellen. Dette ble gjort for å sikre at spredekapasitansene fra lederen ble holdt på et så lavt nivå som mulig samt for å sikre at jordpotensialet var likt for hele strømkabelen. Deretter ble prøveobjektet tilknyttet via et festepunkt på et bord. Dette skyldes at testobjektet ofte flyttet på seg når spenning stod på, og følgelig hendte det at mikroskoplinsen ikke traff riktig fokus. Når PD-målinger ble foretatt, ble en koblingskondensator på 100 nF koblet i parallell med testobjektet som forklart i kapittel 2.1. I serie med koblingskondensatoren var også PD-systemet koblet til. I tillegg ble det også benyttet et lavpassfilter for å dempe støyen fra høyspenningsforsterkeren. Grunnen til at PD-systemet ikke var tilkoblet hele tiden skyldes at målesystemet var i bruk av flere personer.



Figur 3.3: Koblingskjema

Videre ble prøveobjektene festet til kretsen ved krokodilleklemmer og lagt i en skål fylt med silikonolje for å redusere faren for overflateutladninger. Skåla ble så lagt over et plexiglass som skulle beskytte linsen i mikroskopet. Det ble etter beste evne unngått skarpe kanter i oppsettet for å unngå corona. Figur 3.3 illustrerer oppkoblingen inkludert PD-utstyr.

Sikkerhet

Hver gang testobjektet havarete oppstod en kortslutningsstrøm så høy at det kunne utgjøre en fare for utstyret, spesielt komponentene i filteret. Fra før inneholdt forsterkeren en strømbegrenser, men ingen direkte utkobling. Det ble derfor benyttet utgangen til forsterkeren merket 'Output curren monitor 1 V/2 mA' og koble denne til utkoblingsboksen. Siden denne boksen inneholdt et relé som slo ut ved spenninger rundt 3-4 V, ble forsterkeren skrudd av dersom strømmen overgikk 6-8 mA. Selve oppsettet utenom signalgeneratoren og datamaskinen var inne i en avsperrert celle for å hindre at noen kom i kontakt med strømførende deler mens forsøkene pågikk. Om døra til cellen gikk opp, gjorde et automatisk utkoblingsystem koblet til forsterkeren at spenningen ble skrudd av. Mellom forsøkene ble en jordstav benyttet for å sikre at eventuelle ladninger som befant seg på kondensatoren ble ledet til jord.

3.3 Analyse

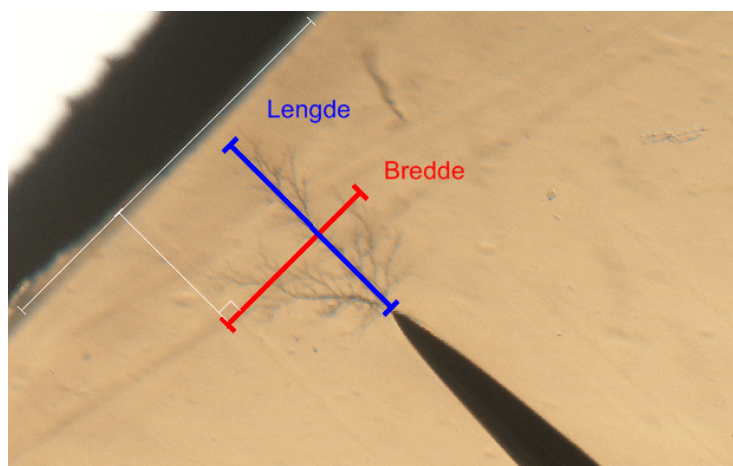
3.3.1 Elektrisk trevekst

For å registrere hvordan de elektriske trærne utviklet seg, var kameraet på mikroskopet koblet til en datamaskin og kontrollert gjennom programmet NIS Elements. Ved hjelp av funksjonen 'Capture timelapse' ble det tatt bilder av skjermen med ønsket hyppighet. I tilfeller hvor det var forventet hurtig vekst ble det lagret bilder hvert 10. sekund, mens det for tregere utvikling ble lagret bilder hvert 15. sekund. Siden testobjektets geometri utgjør stor forskjell på feltstyrken rundt nålspissen, er ikke initieringstid medregnet i målingene så fremt ikke noe annet er nevnt. Dette skyldes for eksempel at en endring av nålspissen sin radius fra $1,5 \mu\text{m}$ til $2,5 \mu\text{m}$ med en avstand fra nål til jord på 1,0 mm, vil redusere den elektriske feltstyrken fra 1690 kV/mm til 1080 kV/mm [16]. Konsekvensen av dette er store forskjeller i initieringstider som ikke direkte kan relateres til påtrykket.

Når frekvensen ble justert, ble alle forsøk gjennomført ved 14 kV. Dette skyldes at dette var den maksimale utgangsspenningen fra tilgjengelig signalgenerator og høyspenningsforsterker. Ved lavere spenninger kunne initieringstiden i frekvensområde 0,1-5,0 Hz være så høy som et par døgn, så spenningen ble derfor ikke satt noe lavere. For målinger ved 50 Hz ble det benyttet en VARIAC og en PD-fri transformator med høyere omsetningsforhold enn den andre høyspentforsterkeren. Dette gjorde at målingene ved 50 Hz kunne gjennomføres helt opp til 20 kV.

Lengde og bredde

Både kontinuerlig bredde- og lengdeutvikling ble registrert for å kunne tallfeste en tendens i trestrukturen ved de ulike påtrykkene. Lengden som ble målt var avstanden mellom hovedgren og jord som førte til gjennomslag. Bredden ble målt ved å strekke en rett linje mellom to ytterpunkter parallelt med jordplanet. Figur 3.4 illustrerer et typisk skjerm bilde av prosessen. Forholdet mellom utviklet bredde og lengde ble senere regnet ut og angitt som en vekstkoefisient.



Figur 3.4: Mål av bredde og lengde

Tidsmålinger

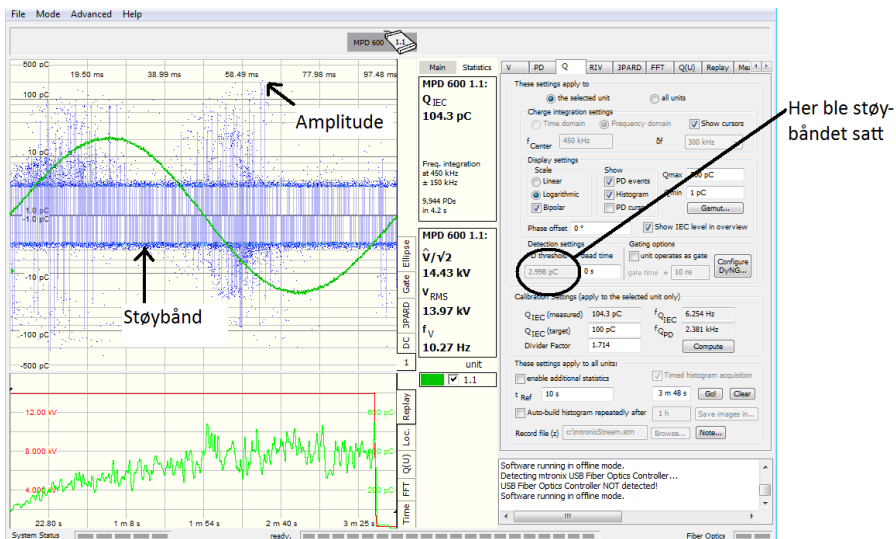
Både initieringstid, tid til første gren når jord og tid til gjennomslag ble registrert. Med initieringstid menes tiden fra spenning ble påsatt til det ble observert trevekst. Tid til første gren når jord ble målt fordi det viste seg at det ikke alltid oppstod gjennomslag med en gang en gren nådde jord. Det ble også registrert tiden det tok fra initiering til det oppstod gjennomslag.

Elektronmikroskop

For å se nærmere på fordelingen av trekanalene ved de ulike frekvensene, ble det benyttet et elektronmikroskop. Et utvalg av testobjekter med karakteristiske trestrukturer ble etter havari rengjort med isopropanol og snittet opp på tvers med en skalpell. Prøvene ble deretter festet til en metallknopp ved hjelp av dobbeltisidig teip og belagt med karbon langs kantene for å unngå at teipen ble varmet opp eller ladet. I tillegg ble en 20 nm tynn gullfilm lagt på overflaten av prøvene slik at hele testobjektet kunne lede vekk elektronstrømmen. Prøvene ble så lagt i et kammer og evakuert til et trykk på rundt 10^{-7} bar før elektronstrømmen ble satt på og analysen kunne starte.

3.3.2 Partielle utladninger

Til å måle utladningsaktivitet under treveksten ble det benyttet et Omicron PD-system der kontinuerlig mengde og størrelse automatisk ble registrert. Siden dette målesystemet bare var tilgjengelig i en kort periode, ble det bare gjennomført en PD-måling per påtrykk. Etter at målingene var gjennomført, ble datamaterialet eksportert til MATLAB for videre behandling. Se vedlegg C for kode.



Figur 3.5: Omicron målesystem

Et typisk skjermbilde av databehandlingen i målesystemet er illustrert i figur 3.5. Når det ble gjennomført PD-målinger, hadde målekretsen flere støykilder som kunne påvirke måleresultatene. Både høyspenningsforsterkeren, andre elektriske komponenter i nærheten kretsen og stor utstrekning på målekretsen var alle potensielle støykilder som lavpassfilteret ikke greide å dempe. Det ble derfor satt en terskelverdi i dataprogrammet for hvor stort støybåndet skulle være. Dette gjorde at alle utladninger under denne verdien ble utelatt i registreringen. Denne verdien ble satt til 3 pC.

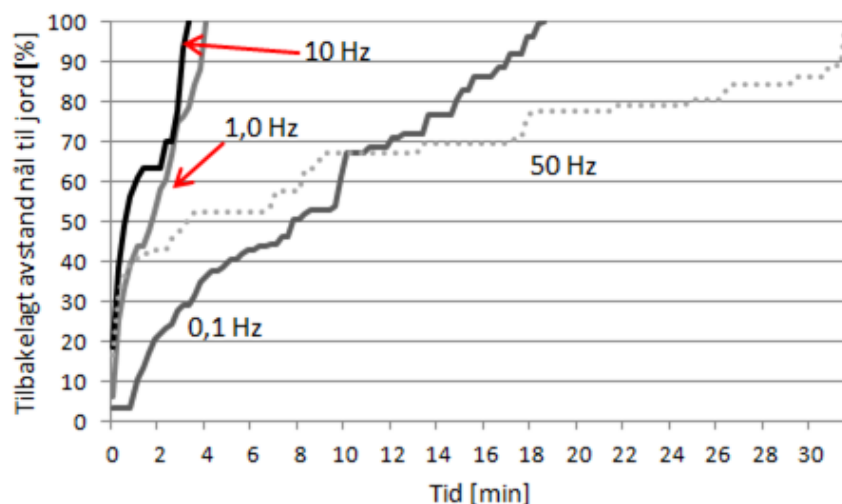
Kapittel 4

Resultater

4.1 Elektrisk trevekst

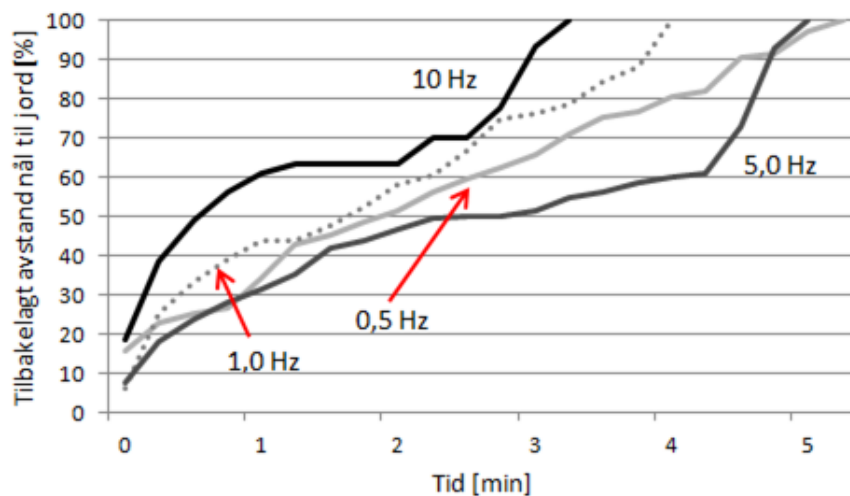
4.1.1 Lengde- og breddeutvikling

Hvordan treveksten utviklet seg i lengderetning for ulike frekvenser ved 14 kV er gjengitt i figur 4.1 og 4.2. Siden tiden fra initiering til sammenbrudd varierte på opp til flere minutter ved samme frekvenspåtrykk, er det gjengitt typiske vekstkurver i stedet for gjennomsnittskurver. Fullstendig lengdeutvikling finnes i vedlegg A.1.



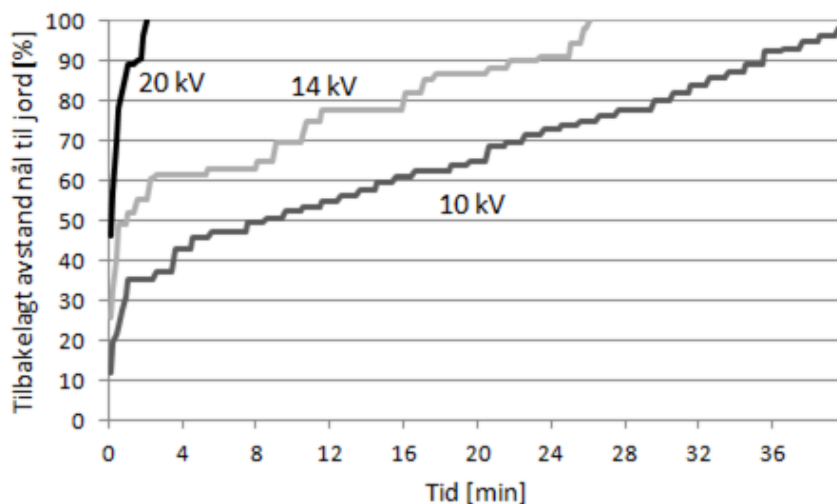
Figur 4.1: Typisk lengdeutvikling for ulike frekvenser ved 14 kV

Verdt å legge merke til i figur 4.1 er at både ved 0,1 Hz og 50 Hz tar det vesentlig lengre tid for trestrukturen å nå jordplanet sammenlignet med 1,0 og 10 Hz. 1,0 og 10 Hz bruker typisk 3-4 minutter mens 0,1 og 50 Hz trenger henholdsvis 18 og 30 minutter. Forløpet for 50 Hz har en utfasingsperiode i midten i motsetning til 0,1 Hz som har en tilnærmet lineær utvikling.



Figur 4.2: Typisk lengdeutvikling ved ulike frekvenser

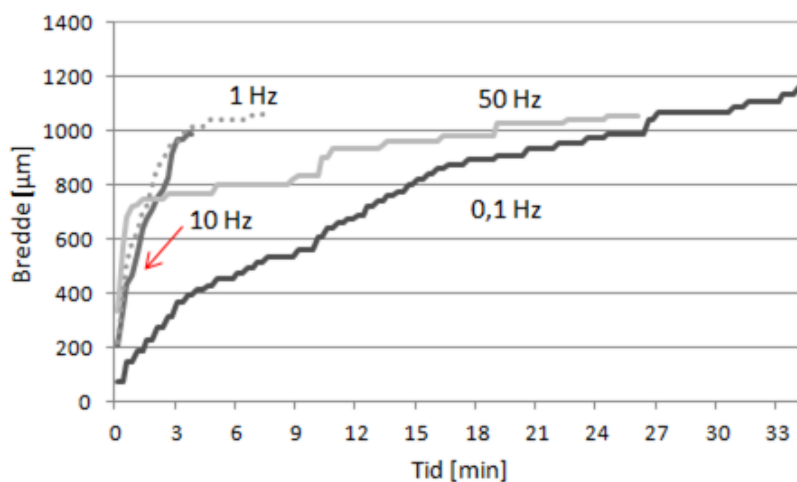
I figur 4.2 er forløpene for 0,1 og 50 Hz utelatt for å tydeliggjøre forløpet mellom 0,5 og 10 Hz. Det kan observeres at 0,5 og 1,0 Hz har en tilnærmet lineær utvikling mens 5,0 og 10 Hz har en utfasingsperiode i midten før den stiger på slutten.



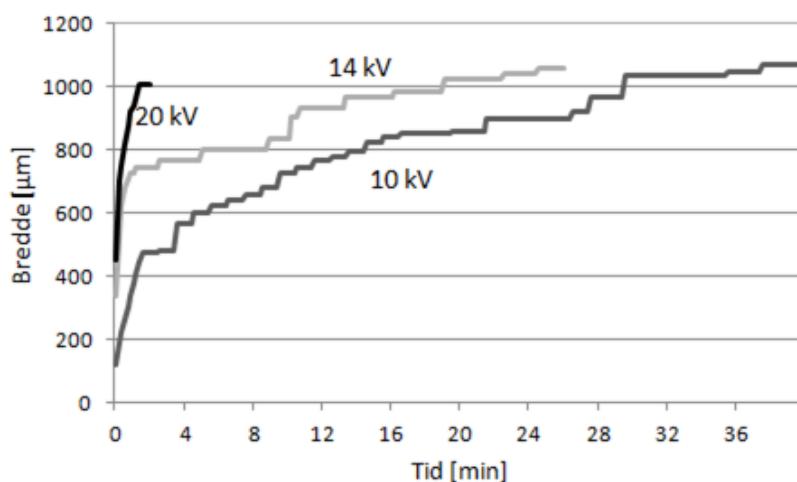
Figur 4.3: Typisk lengdeutvikling for 50 Hz ved 10, 14 og 20 kV

Figur 4.3 viser typiske vekstforløp for 10, 14 og 50 kV ved 50 Hz. Det kan observeres hurtig initiell vekst for alle forløpene og en spenningsavhengig utvikling mot jordelektroden. Mer om vekstrate i kapittel 4.1.2.

I likhet med lengdeutviklingen, illustrerer breddeutviklingen i figur 4.4 typiske forløp for 14 kV ved ulike frekvenser i stedet for gjennomsnittsverdier. Bredden til treveksten like før gjennomslag er tilnærmet like stor ved de ulike frekvensene. Det største spriket ligger mellom 0,1 og 10 Hz hvor avstanden henholdsvis er 1,2 mm og 1,0 mm når gjennomslag skjer. Figur 4.5 synliggjør at total bredde er lite avhengig av påtrykt spenning ved 50 Hz. Hurtigst breddeutvikling forekommer ved 20 kV. For fullstendig breddeutvikling, se vedlegg A.2.

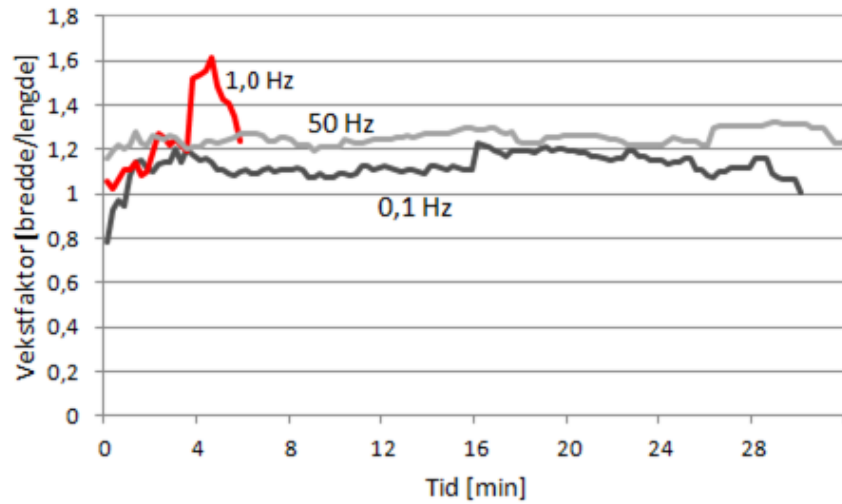


Figur 4.4: Typisk breddeutvikling for ulike frekvenser ved 14 kV



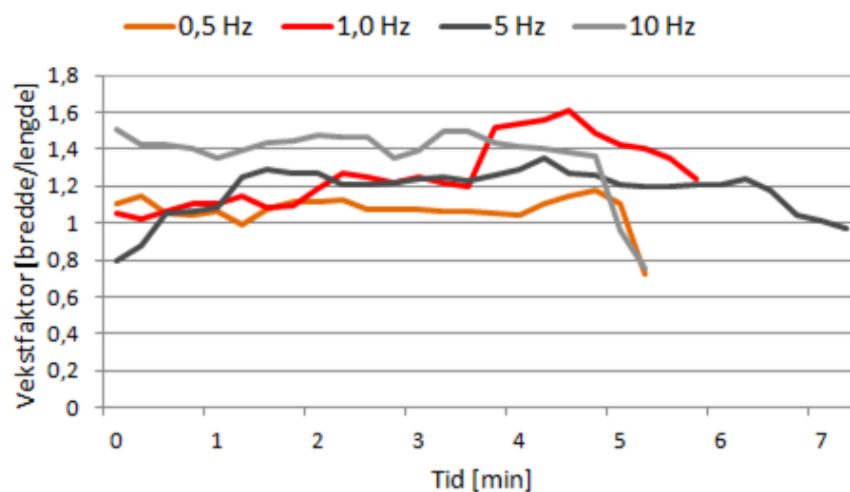
Figur 4.5: Typisk breddeutvikling for 50 Hz ved 10, 14 og 20 kV

En annen måte å beskrive treutviklingen er å se hvordan forholdet mellom bredde og lengde utvikler seg over tid. Figur 4.6 og 4.7 viser en gjennomsnittlig utvikling av dette forholdet for et utvalg av frekvenser.



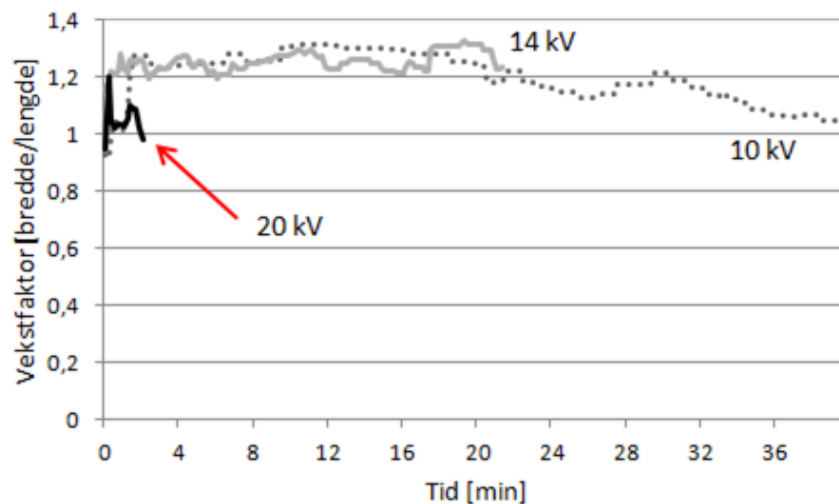
Figur 4.6: Gjennomsnittlig vekstfaktor ved 14 kV for 0,1, 1,0 og 50 Hz

Av figur 4.6 er det verdt å merke seg at vekstfaktoren er over 1 hele tiden bortsett fra i begynnelsen med 0,1 Hz, noe som igjen betyr at trærne vokser mer i bredden enn i lengderetning. Like før sammenbrudd kan det observeres at vekstfaktoren synker, spesielt ved 1,0 Hz.



Figur 4.7: Gjennomsnittlig vekstfaktor ved 14 kV for 0,5, 1,0, 5,0 og 10 Hz

I figur 4.7 er flere frekvenser inkludert og viser et lignende forløp som i figur 4.6. Vekstfaktoren er som regel over 1 bortsett fra på slutten ved 0,5 og 10 Hz og ligger i snitt rundt 1,2. Mot slutten av vekstperioden synker vekstfaktoren i alle tilfellene.

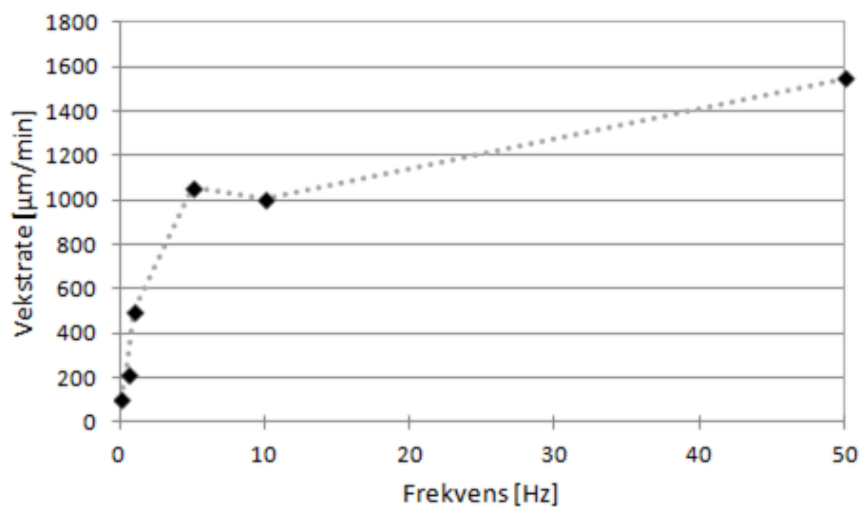


Figur 4.8: Gjennomsnittlig vekstfaktor for 50 Hz ved 10, 14 og 20 kV

Figur 4.8 illustrerer et lignende forløp som når frekvensen ble variert. Vekstfaktoren er stort sett over 1 og synker på slutten.

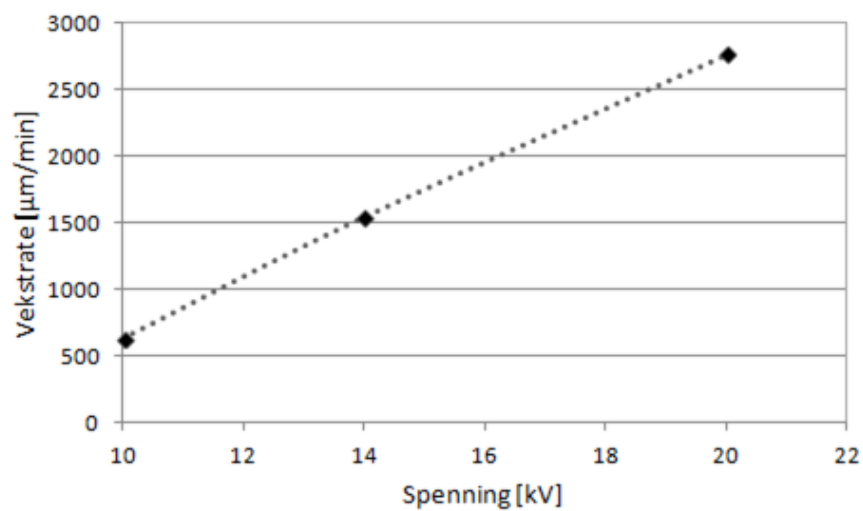
4.1.2 Vekstrate

For å undersøke nærmere hvordan vekstraten varierer, er det valgt å dele opp utviklingen i tre deler som beskrevet i kapittel 2.2.1. Oppdelingen har blitt gjort ved å spiltte vekstforløpene i lengderetning fra 0-20 %, 20-70 % og 70-100 % hvor 100 % indikerer at den lengste trekanalen har nådd jordplanet. Punktene markerer gjennomsnittsverdier mens den stiplede linje er en rett linje mellom to målepunkter.



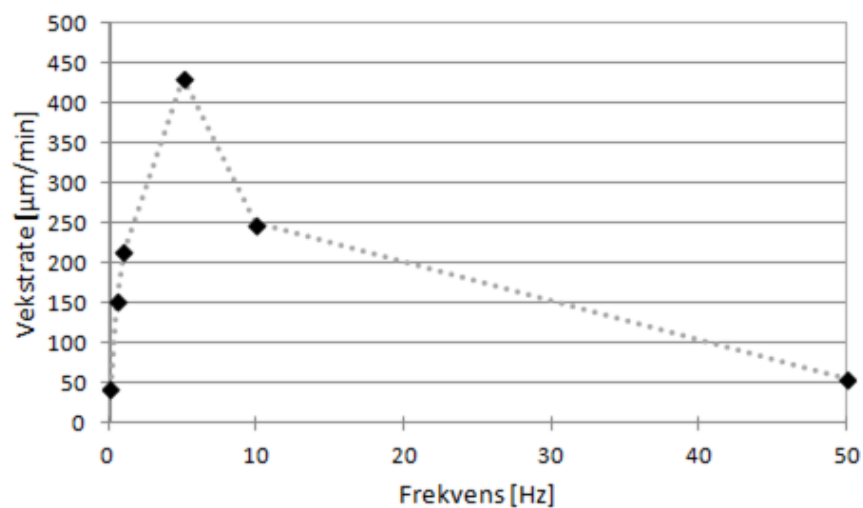
Figur 4.9: Vekstrate i lengderetning 0-20 % for ulike frekvenser ved 14 kV

Figur 4.9 viser gjennomsnittlig initiell vekstrate som funksjon av frekvens. Det kan observeres at ved å øke frekvensen som regel vil føre til en økt vekstrate. Ved 0,1 Hz var vekstraten 100 $\mu\text{m}/\text{min}$ mens den ved 50 Hz var hele 1500 $\mu\text{m}/\text{min}$.



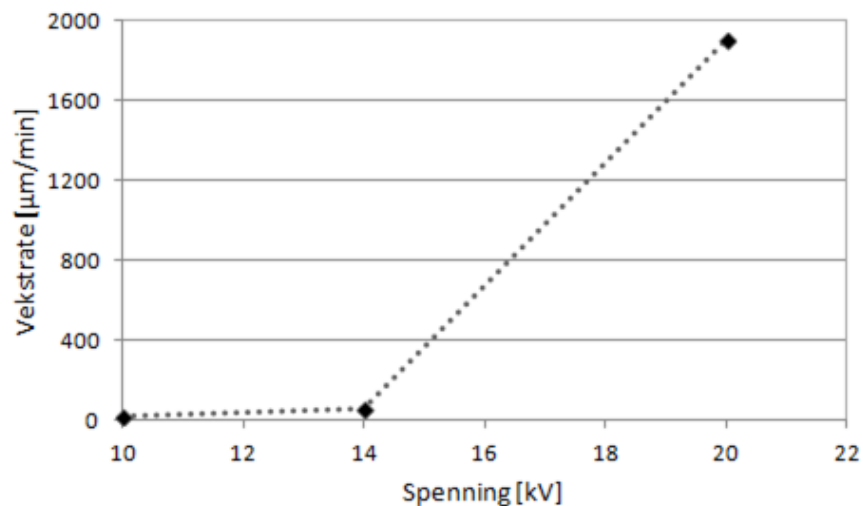
Figur 4.10: Initiell vekstrate i lengderetning for ulike spenningsnivå ved 50 Hz

Den gjennomsnittelige initielle vekstraten for 10, 14 og 20 kV ved 50 Hz er illustrert i figur 4.10 og antyder en lineær sammenheng mellom økt spenning og initiell vekstrate. Ved 10 kV er vekstraten $600 \mu\text{m}/\text{min}$ mens den ved 20 kV er hele $2800 \mu\text{m}/\text{min}$.



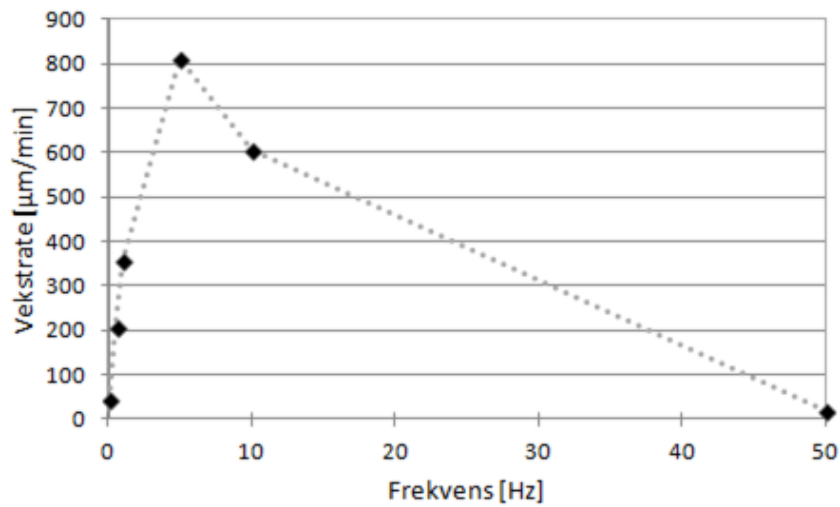
Figur 4.11: Vekstrate i lengderetning 20-70 % for ulike frekvenser ved 14 kV

I figur 4.11 kommer det tydelig frem at vekstraten øker fra 50 til 400 $\mu\text{m}/\text{min}$ mellom 0,1 og 5,0 Hz før den synker ned og når omtrent samme verdi som 0,1 Hz ved 50 Hz.



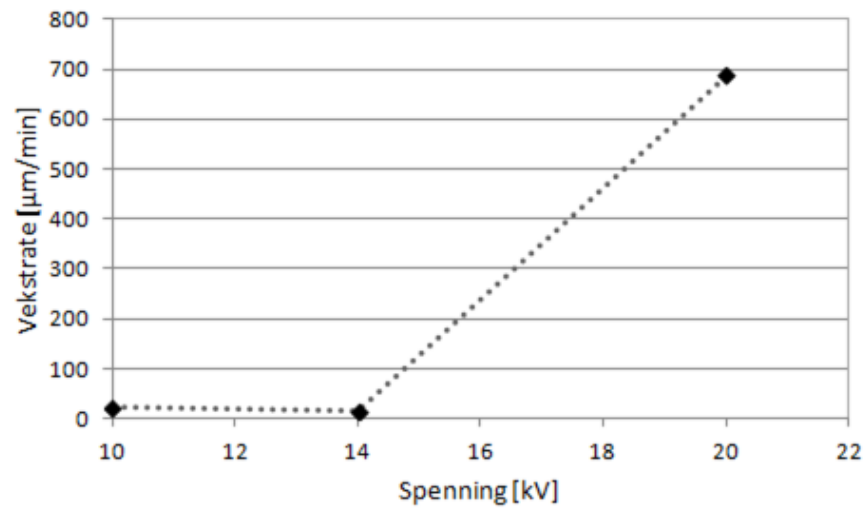
Figur 4.12: Vekstrate i lengderetning 20-70 % for ulike spenningsnivå ved 50 Hz

Når frekvensen holdes konstant 50 Hz, synliggjør figur 4.12 at vekstraten ved 20 kV er vesentlig høyere enn for 10 og 14 kV. Mens vekstraten ligger rundt 40 $\mu\text{m}/\text{min}$ for 10 og 14 kV er den 1900 $\mu\text{m}/\text{min}$ for 20 kV.



Figur 4.13: Vekstrate i lengderetning 70-100 % for ulike frekvenser ved 14 kV

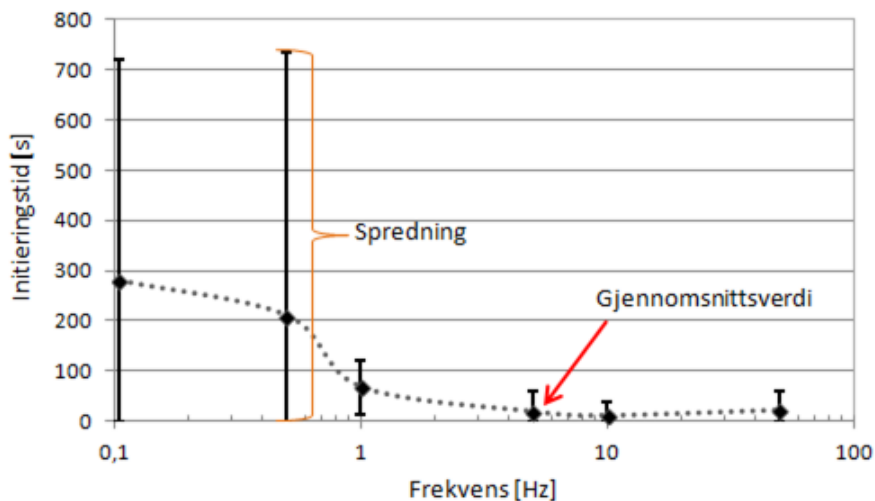
Figur 4.13 illustrerer hvordan vekstraten i gjennomsnitt er når den lengste trekanalen nærmer seg jordelektroden. Forløpet kan minne om vekstraten ved 20-70 %, men nå ligger verdiene til vekstraten jevnt høyere. Den høyeste gjennomsnittsverdien forekommer ved 5 Hz og er omtrent 800 $\mu\text{m}/\text{min}$. Gjennomsnittlig vekstrate for 0,1 og 50 Hz er henholdsvis 44 og 17 $\mu\text{m}/\text{min}$.



Figur 4.14: Vekstrate i lengderetning 70-100 % for ulike spenningsnivå ved 50 Hz

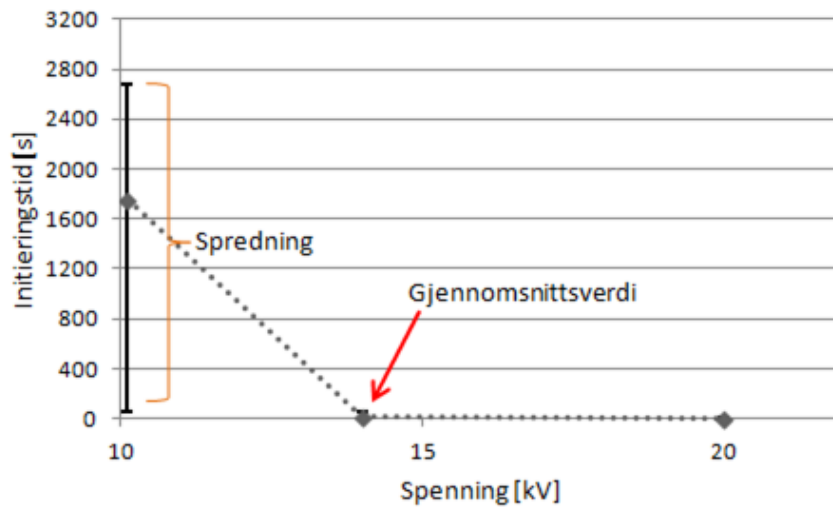
I figur 4.14 kan det observeres at vekstraten ved 20 kV er 700 $\mu\text{m}/\text{min}$ mens den for 10 og 14 kV er 20 $\mu\text{m}/\text{min}$.

4.1.3 Tidsmålinger



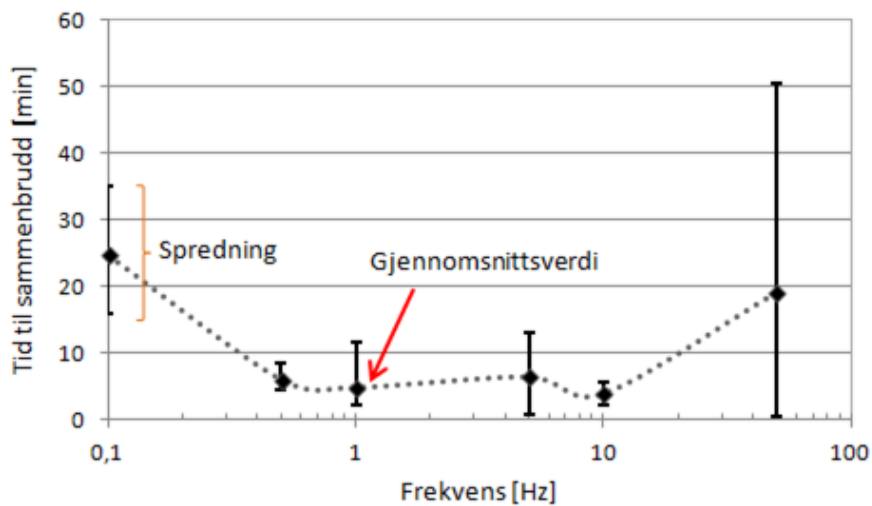
Figur 4.15: Initieringstid for 14 kV ved ulike frekvenspåtrykk

Figur 4.15 viser hvordan initieringstiden varierte med hvilken frekvens som var påtrykt. Initieringstiden varierte mellom 0 og 12 minutter for 0,1 og 0,5 Hz og lå for disse frekvensene i snitt rundt 4 minutter. Ved høyere frekvens sank initieringstid og spredning vesentlig, og gjennomsnittlig initieringstid for frekvensområdet 1,0-50 Hz lå på rundt 30 sekunder. Det er også verdt å legge merke til at det for alle frekvenspåtrykkene forekom prøver hvor treveksten startet umiddelbart etter at spenning ble satt på.



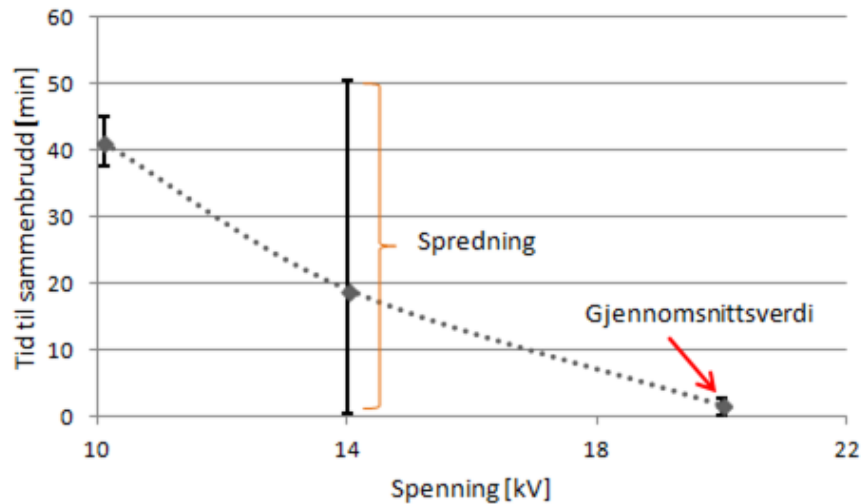
Figur 4.16: Initieringstid for ulike spenninger ved 50 Hz

Initieringstiden ved 50 Hz for ulike spenningsnivå er illustrert i figur 4.16. Det kan observeres at alle forsøkene ved 14 og 20 kV hadde initieringstid under 30 sek. Ved 10 kV ble det registrert initieringstider mellom 1 og 46 minutter.



Figur 4.17: Tid til sammenbrudd fra initiering for 14 kV ved ulike frekvenspåtrykk

I figur 4.17 er det gjengitt hvordan tid til sammenbrudd (TTS) varierer som funksjon av påtrykt frekvens. Som nevnt tidligere er tid til sammenbrudd målt fra første tregren er observert. Også for disse målingene skiller 0,1 og 50 Hz seg ut ved at gjennomsnittelig sammenbruddstid ligger på henholdsvis 25 og 19 minutter. Ved de andre frekvensområdene ligger sammenbruddstiden på omtrent 5 minutter. Det kan også observeres en spredning på hele 50 minutter for 50 Hz påtrykk.



Figur 4.18: Tid til sammenbrudd fra initiering for ulike spenninger ved 50 Hz

Figur 4.18 antyder en lineær sammenheng mellom påtrykt spenning og TTS. Ved 10 kV er gjennomsnittstiden 40 minutter mens den for 20 kV er 2 minutter.

Videre ble det i enkelte forsøk ved lave frekvenser observert at selv om treveksten hadde nådd jordplanet, så havarete ikke testobjektet momentant. Tabell 4.1 oppsummerer gjennomsnittsavvik mellom TTS og tid til første gren nådde jord (TTJ)

Tabell 4.1: Avvik mellom TTS og TTJ

Frekvens [Hz]	0,1	0,5	1,0	5,0	10	50
Gjennomsnittsavvik [s]	42	9	0	0	0	0
Spredning [s]	0-90	0-30	0	0	0	0

Tabell 4.1 antyder at det ved frekvenser <1 ikke alltid vil slå gjennom i det øyeblikk første gren når jordplanet.

4.1.4 Form

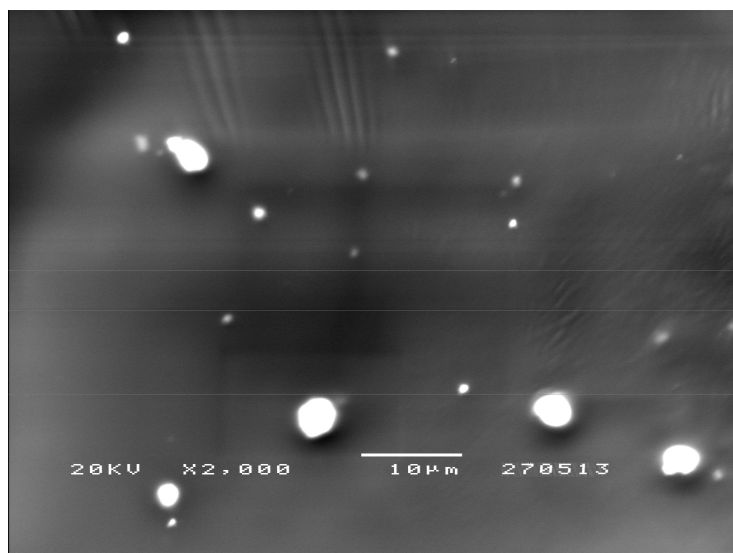
Trestrukturen forandret seg med hvilken frekvens som ble påtrykt. En oppsummering av den generelle strukturdannelsen er gitt i tabell 4.2.

Tabell 4.2: Strukturdannelse ved 14 kV

Frekvens [Hz]	Beskrivelse
0,1	Grenvekst
0,5	Grenvekst
1,0	Grenvekst
5,0	Tett grenvekst
10	Buskvekst
50	Tett buskvekst

Som oppsummert i tabell 4.2 oppstod enkel grenvekst kun i frekvensområdet 0,1 - 1,0 Hz. Ved 5,0 Hz ble det observert en tett grenvekst som minnet om buskvekst, mens det for 10 Hz utelukkende ble observert buskvekst. For 50 Hz var det tett buskvekst bortsett fra en prøve som hadde grenvekst. Når spenningen ble justert mellom 10 og 20 kV, ble det observert tett grenvekst.

Figur 4.19, 4.20 og 4.21 er bilder fra elektronmikroskopanalysen og viser hvordan kanalene er fordelt gjennom lyse prikker. I figur 4.19 kan det observeres enkelte kanaler med en diameter på 3-4 μm og at avstanden mellom hver kanal er omkring 10 μm .

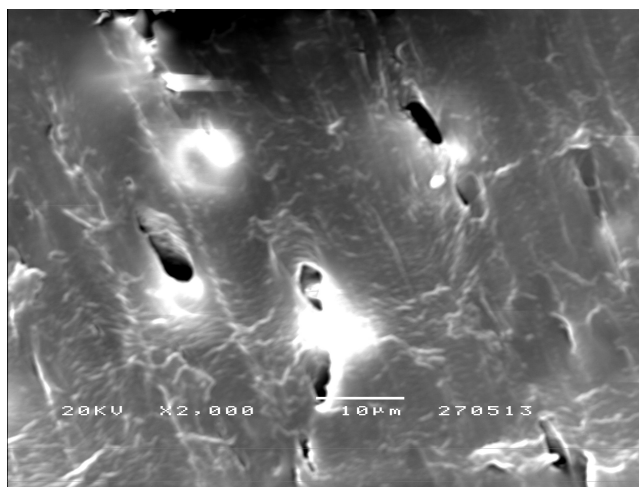


Figur 4.19: Fordeling av trekanaler ved 0,1 Hz



Figur 4.20: Fordeling av trekanaler ved 10 Hz

Kanalfordeling for en havarert prøve med 10 Hz 14 kV er illustrert i figur 4.20. Kanalene er i dette tilfellet mer konsentrert enn for 0,1 Hz med en avstand på omkring 3 μm .



Figur 4.21: Fordeling av trekanaler ved 50 Hz

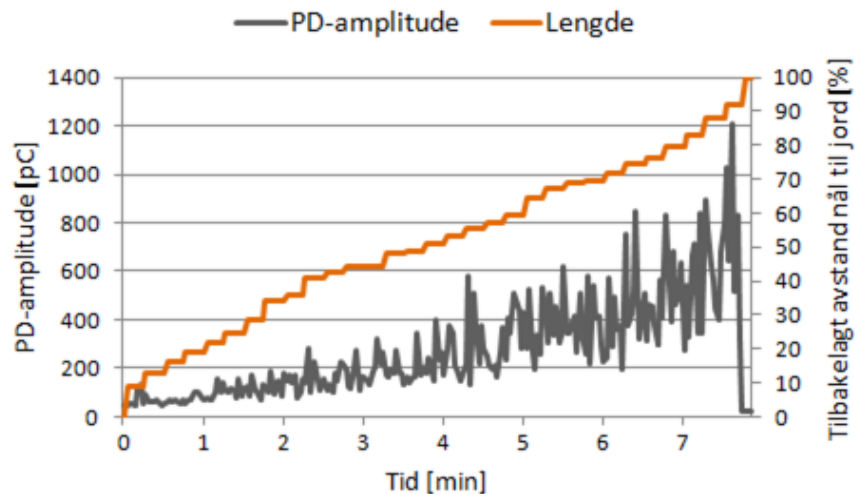
Utsnittet av en prøve belastet med 14 kV 50 Hz er vist i figur 4.21 og viser flere sammenhengende kanaler på kryss og tvers i tillegg til fire tydelige kanaler.

4.2 Partielle utladninger

Som nevnt tidligere pågikk det kontinuerlig utladningsaktivitet i løpet av vekstprosessen. Målesystemet fanget opp både størrelse, mengde og faseforløp til utladningene, men i tillegg var det også nødvendig å ta stillbilder av treveksten underveis for å se hvordan korrelasjonen var mellom utladninger og trevekst. For utladningsaktivitet ved 0,1 og 1,0 Hz henvises det til vedlegg B.1.

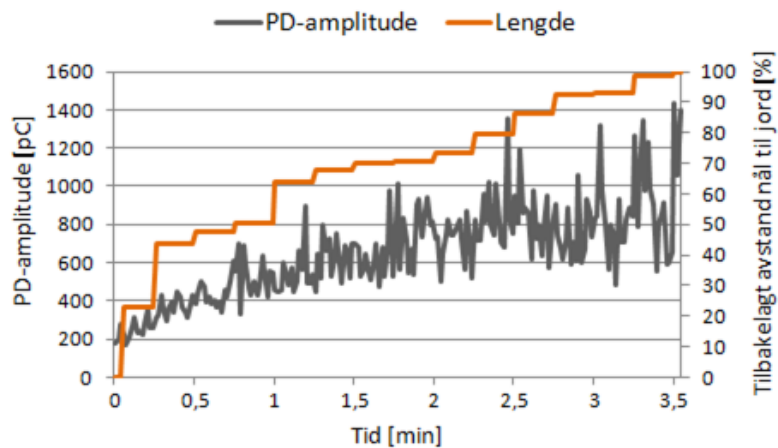
4.2.1 Amplitudeverdier

Figur 4.22 viser hvordan amplituden til utladningene utviklet seg mens treveksten pågikk ved 14 kV 0,5 Hz. Det kan observeres en jevn økning i amplitude fra initiering til gjennomslag med en toppverdi på 1200 pC.



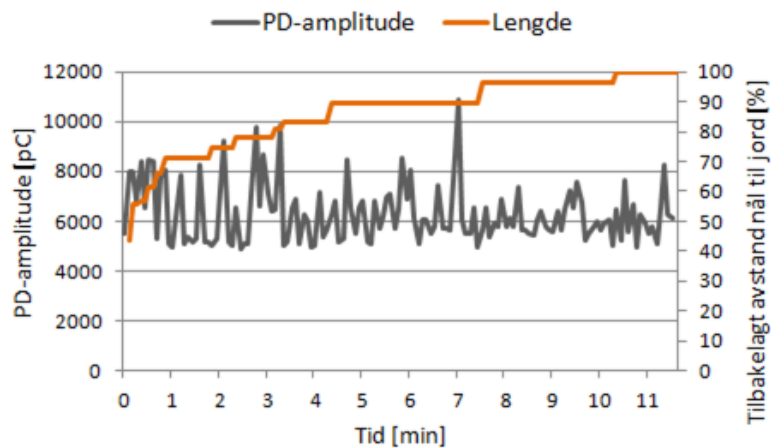
Figur 4.22: PD-utvikling ved 14 kV 0,5 Hz

I figur 4.23 kan det observeres et lignende forløp som i figur 4.22 innledningsvis før amplituden jevner seg litt ut. Det er også verdt å legge merke til at toppverdien ved 10 Hz er snaut 200 pC høyere enn ved 0,1 Hz.



Figur 4.23: PD-utvikling ved 14 kV 10 Hz

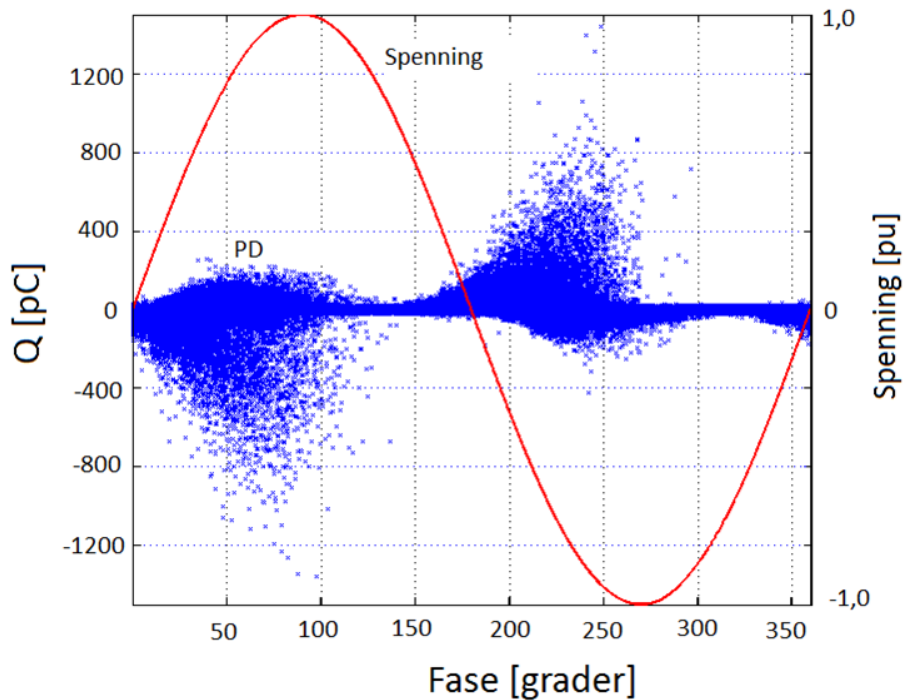
Forløpet for 50 Hz som vist i figur 4.24 indikerer ingen særlig økning i amplitudeverdi over tid selv om trekanalene nærmer seg jordplanet. Likevel er det en vesentlig økning i toppverdiene til utladningene ved 50 Hz sammenlignet med de lavere frekvenspåtrykkene. Ved 0,1 og 10 Hz når amplituden 1400 pC mens den for 50 Hz når 11 nF.



Figur 4.24: PD-utvikling ved 14 kV 50 Hz

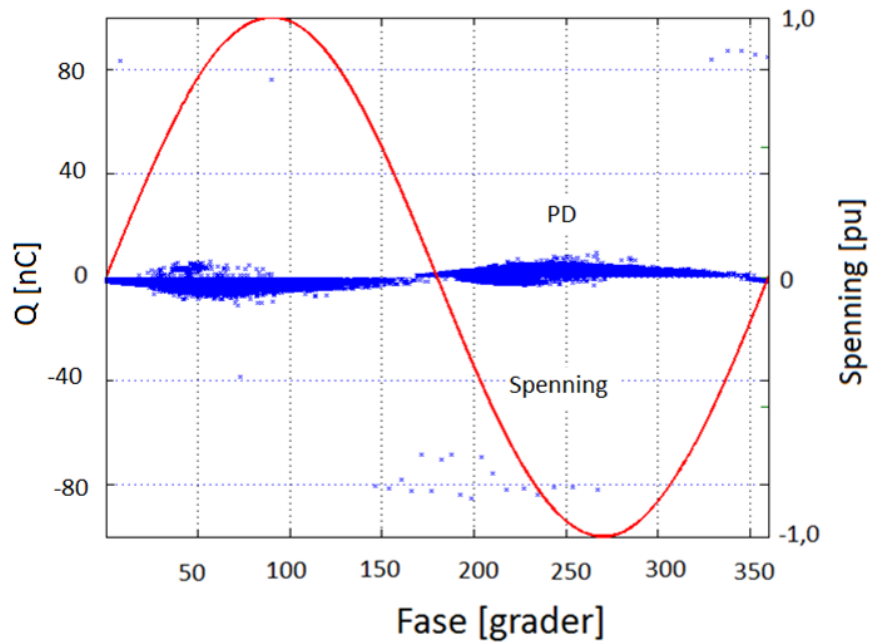
4.2.2 Faseforløp

For frekvenser mindre eller lik 1,0 Hz, slet målesystemet å plassere utladningene rett i henhold til fasen. Det var derfor vanskelig å trekke noen konklusjoner basert på disse plottene. Faseplottene for 0,1 og 1,0 Hz finnes i vedlegg B.2. Toppverdiene i faseforløpene kan avvike litt fra grafene i forrige delkapittel fordi da ble gjennomsnittlig amplitudeverdi plottet mens det nå vises samtlige utladninger.



Figur 4.25: Faseplot ved 14 kV 10 Hz

Figur 4.25 viser når utladningene forekom i forhold til den påsatte sinus-spenningen ved 10 Hz. Det kan observeres en samling interne utladninger med negative toppverdier når spenningen øker og en samling positive toppverdier når spenningen synker. Det er også verdt å legge merke til at det har oppstått enkelte coronautladninger siden enkelte utladninger forekommer når spenningen er $\pm 1,0$ pu.



Figur 4.26: Faseplot ved 50 Hz

Når det påtrykkes 50 Hz, kan det i figur 4.26 observeres et lignende forløp som ved 10 Hz ved at de fleste toppverdiene oppstår når spenningen øker eller synker. Størrelsen på disse er imidlertidig hele 10 nC. Enkelte utladninger blir også målt til å være 80 nC.

Kapittel 5

Diskusjon

I dette kapitlet vil måleresultatene drøftes i lys av tidligere publikasjoner, målemetode og teori.

Lengde- og breddeutvikling

Figur 4.1 og 4.3 viser at vekstforløpene i lengderetning har en klar sammenheng med hvilken frekvens eller spenning som påtrykkes. Forløpet for 0,1 Hz har en jevn utvikling mens utviklingen for 50 Hz har en rask initiell vekst før den flater ut. Den visuelle fremstillingen av forløpet i frekvensområde 0,5-10 Hz blir litt påvirket av utviklingen til 0,1 og 50 Hz, det henvises derfor til figur 4.2 hvor disse frekvenser er utelatt. I forhold til kategoriseringen gjort i figur 2.5 kommer det tydelig frem at vekstforløpene for 0,1-1,0 Hz minner om ordinær grenstruktur, mens det ved 5,0 og 10 Hz har oppstått en blanding mellom gren- og buskstruktur. Forløpet for 50 Hz minner om buskvekst. Sammenlignet med resultatene gjengitt i tabell 4.2 er det god korrelasjon mellom observert form og oppdelingen beskrevet i kapittel 2.2.1 gjort av Zheng [9].

Hvorfor vekstforløpene er forskjellig med påtrykket kan forklares ved at når frekvensen øker, så vil forholdet mellom spenningen over trekanalene og påtrykt spenning øke som vist i likning 2.3. Da vil mer av den frigjorte energien fra utladningene bidra til trevekst, og en sannsynlig konsekvens av dette er bredere og mer avrundet trevekst. Når mindre spenning legger seg over trekanalene, tyder dette på større motstand langs trekanalene. Sannsynligheten for utladningsaktivitet vil da være mindre og den frigjorte energien vil heller bidra til vekst i lengderetning.

Breddeutviklingen som vist i figur 4.4 og 4.5 indikerer at avstanden mellom de ytterste grenene i mindre grad påvirkes av hvilken frekvens eller spenning som påtrykkes. Det er viktig å påpeke at figurene viser *typiske* forløp, og at det i vedlegg B2 kommer frem at enkelte prøver viste avvik på $\pm 200 \mu\text{m}$ i forhold til nominell bredde. Resultatene viser imidlertid en tendens at forsøkene ved 0,1 og 50 Hz ender opp med den største bredden og er 100-200 μm lengre enn ved 0,5-10 Hz. En sannsynlig forklaring på dette skyldes at ved disse frekvensene foregikk treveksten gjerne 20 minutt lengre enn for 0,5-10 Hz og fikk dermed mer tid til å utvikle seg i bredden.

Gjennomsnittelig vekstkoeffisient (bredde/lengde) for de forskjellige påtrykkene er gjengitt i figur 4.6, 4.7 og 4.8. Verdt å legge merke til er at forholdet store deler av vekstforløpet er >1 for alle påtrykk bortsett fra mot slutten for 0,5, 5,0 og 10 Hz. Sammenlignet med framstillingen gjort i figur 2.6 er det liten korrelasjon mellom utregnet vekstkoeffisient og foreslått form. Grenveksten som forekom mellom 0,1 og 5,0 Hz har et forhold mellom bredde og lengde høyere enn 1 og synker mot slutten. Observasjonene til Zheng [9] foreslår imidlertid en vekstkoeffisient under 1 og stigende mot slutten for dobbelstruktur. Sannsynligvis skyldes avviket at forsøkene til Zheng ble gjort i frekvensområde 50-2000 Hz samt at avstanden mellom nål og jord var 3 mm, mens det i denne masterrapporten har blitt undersøkt fra 0,1 til 50 Hz med en avstand mellom nål og jord på 1,1 mm.

Vekstrate

I undersøkelsen av vekstrate ble det valgt å dele opp utviklingen i tre faser som forklart i kapittel 2.2.1. Oppdelingen i lengderetning fra 0-20, 20-70 og 70-100 % ble gjort på bakgrunn av egne antakelser om at de ulike fasene befant seg innenfor disse intervallene samt tidligere forsøk på NTNU [18].

Forsøk gjort av Chen [8] i frekvensområdet 20-500 Hz viser at økt frekvens akselererer vekstraten og følgelig minsker tid til sammenbrudd. Videre ble det for frekvensområdet 20-50 Hz observert at vekstraten var størst innledningsvis før den avtok og til slutt økte igjen mot slutten. Ytterstad [10] sine forsøk ved 12 kV konkluderte med at gjennomsnittelig vekstrate øker fra 59 μm ved 0,1 Hz til rundt 1600 μm ved 50 Hz. I samme rapport ble det som nevnt i kapittel 2.2.3 også funnet at det oppstod grenvekst ved 0,1 Hz og buskvekst ved 50 Hz.

Figur 4.10 viser initiell vekstrate som funksjon av frekvens. Det kan observeres at vekstraten øker med frekvensen i et lineært forløp fram til 5,0 Hz før vekstraten får en ulineær karakteristik mellom 5,0 og 50 Hz. Et lignende forløp kan observeres i figur 4.11 og 4.13 for 20-70 % og 70-100% av lengderetning bortsett fra at vekstraten synker for 50 Hz til rundt 40 μm i stedet for å øke til 1500 μm . Når spenningen varieres mellom 10 og 20 kV, virker den initiale vekstraten til å øke proporsjonalt med spenningen som vist i figur 4.10. I området 20-70 % og 70-100% derimot minner veksten mer om eksponentiell utvikling, se figur 4.12 og 4.14.

Bruken av likning 2.4 utledet i kapittel 2.2.3 er derfor avhengig av hvilken form som utvikles, samt hvilken av de tre fasene treveksten befinner seg i. I forsøkene hvor spenningen var konstant 14 kV, er det sannsynlig at

den kombinerte tre- og hulromsgeometriske faktoren K' spiller en stor rolle i det frekvensen går fra 5,0 Hz til 10 Hz. Dette skyldes trolig at den observerte trestrukturen i dette tilfellet går fra gren- til buskvekst. Da vil som kjent treveksten bli mer avrundet og vokse mindre i lengderetning. Samtidig øker amplitudeverdiene til utladningene over tid som vist i figur 4.22 og 4.23 for henholdsvis 0,5 og 10 Hz. For den initielle veksten virker dette derimot ikke å ha så mye å si til tross for at amplitudeverdiene er 300 pC for 10 Hz og 100 pC for 0,5 Hz. Antakelsen om lik størrelse q_a på utladningene ser derfor ut til å være en grei antakelse for frekvenser opp til 10 Hz da vekstraten ligner et lineært forløp. Over 10 Hz ser det ikke ut som likning 2.4 tilfredstiller det registrerte forløpet, spesielt ikke for 20-70 % og 70-100% av lengderetning da vekstraten i disse tilfellene synker i stedet for å øke proporsjonalt. PD-amplituden øker jevnt både for 0,5 og 10 Hz opp til henholdsvis 1200 og 1400 pC mens det for 50 Hz registreres utladninger på hele 11 nF som vist i figur 4.24. For at likningen for vekstrate skal gjelde er det derfor nødvendig å anta at utladningene er en funksjon av både tid og frekvens $q_a = q_a(f, t)$

Når spenningen justeres mellom 10 og 20 kV for 50 Hz, har den initielle vekstraten et lineært forhold som vist i figur 4.10. Ifølge likning 2.4 skal derimot vekstraten øke med kvadratet av spenningen dersom de andre parameterne er konstante. For alle målte spenningsnivå ved 50 Hz ble det registrert buskvekst. Det ble ikke foretatt PD-målinger for 10 og 20 kV, men det er naturlig å anta at PD-amplituden øker med påtrykt spenning siden feltstyrken i hulrommene øker og gjør at det nå oppstår overslag i hulrommene som så langt har tålt belastningen grunnet for lav spenning eller for stor diameter. Dette er også i samsvar med tidligere studier [19]. Utladningen i likning 2.4 er derfor nødt til å utvides til å være en funksjon av tid, frekvens og spenning $q_a = q_a(f, t, V)$

Likning 2.4 kan altså i enkelte tilfeller benyttes. Problemet er imidlertid at den geometriske parameteren K' vanskelig lar seg beregne og er forskjellig for hver enkelt trestruktur. I tillegg vil spenningen over trekanalene være i forandring slik at det vil være nødvendig å anta at K' er en funksjon av tid, spenning, frekvens, hulromsstørrelse og trestruktur.

Tidsmålinger

Initieringstiden har som forklart i kapittel 3.3.1 blitt behandlet som en separat parameter i denne masteroppgaven. Likevel tyder resultatene fra disse målingene på en viss sammenheng mellom initieringstid og påtrykk. Dette er også i samsvar med tidligere studier [10, 16]. Figur 4.15 og 4.16 viser at økt spenning og/eller frekvens er med på å redusere initieringstiden. For alle frekvenser ved 14 kV ble det registrert enkelte prøver med null initieringstid, men gjennomsnittet for 0,1 og 0,5 Hz lå på 4 minutter. Fra 5,0-50 Hz var initieringstiden rundt 30 sekunder. Det mest interessante fra disse målingene er imidlertid den store spredningen som forekom ved 0,1 og 0,5 Hz. Selv om gjennomsnittet lå på 4 minutter, ble det registrert initieringstider både på 3 sekunder og helt opp til 11 minutter. Som forklart i kapittel 2.2.1 og 3.3.1 er initiering av trevekst en kompleks prosess hvor nålradius, molekylstruktur, urenheter og Maxwell-krefter alle er parametere som spiller inn. Jo hurtigere det oppstår hulrom, desto hurtigere vil treveksten oppstå. Sannsynligvis skyldes avviket i måleresultatene at den valgte produksjonsprosessen ikke gjorde det mulig å lage *identiske* prøveobjekt med lik avstand mellom nålspiss og jord for alle prøver, og at det i enkelte tilfeller kunne være hulrom rundt nålspissen allerede før prøven ble satt under spenning. For frekvenser $>1,0$ Hz hadde dette mindre betydning siden spredningen i disse tilfellene var <1 minutt. Når spenningen ble justert mellom 10 og 20 kV, viser figur 4.16 at økt spenning også gir redusert initieringstid. En mulig forklaring på hvorfor økt frekvens eller spenning reduserer initieringstiden er at det dielektriske tapet er med å øke temperaturen i isolasjonen. Siden dielektrisk tap er proporsjonal med blant annet frekvens og kvadratet av spenning [1], er det derfor naturlig å anta at initieringstiden synker da økt varmeutvikling er med å svekke de dielektriske egenskapene.

Tid til sammenbrudd (TTS) for ulike frekvens- og spenningspåtrykk er illustrert i figur 4.17 og 4.18. I likhet med resultatene for lengdeutvikling og vekstrate, er det tydelig at TTS er avhengig av strukturen til trærne som igjen påvirkes av påtrykket. Mens TTS for 0,1 Hz 14 kV var 25 minutter, var den for 1,0 Hz 14 kV bare 5 minutter. For 5,0 Hz steg TTS litt igjen på grunn av en strukturforandring fra ordinær grenvekst til tett grenvekst. Ved 14 kV 50 Hz ble det utelukkende registrert tett buskvekst, og siden vekstraten for disse tilfellene ved 20-70 % og 70-100% av lengderetning er omtrent det samme som for 0,1 Hz, var det bare fem minutter forskjell i TTS for disse to frekvenspåtrykkene.

Form

Tabell 4.2 oppsummerer hvilken trestruktur som oppstod ved de ulike frekvensene. Illustrasjoner av forskjellige snitt er vist i figur 4.19, 4.20 og 4.21. Den største forskjellen mellom forløpet for 0,1 Hz og 10 Hz er avstanden mellom kanalene. For 0,1 Hz ligger avstanden omtrent på 10 μm mens det ved 10 Hz er 3 μm . At avstanden mellom kanalene er større for 0,1 Hz enn 10 Hz, er som forventet siden buskvekst skal ha en tettere og mer kompakt trevekst enn ordinær grenvekst. Ved 50 Hz ble det registrert buskvekst som vist i figur 4.21 med så tett trevekst at flere av kanalene vokste sammen som vist i figur 2.4b og skilte seg derfor fra buskveksten som forekom ved 10 Hz.

PD-målinger

Figur 4.22 og 4.23 viser at PD-amplituden øker med lengdeutviklingen til de elektriske trærne for 14 kV 0,1 og 10 Hz. I den initiale vekstfasen er amplituden henholdsvis 100 og 300 pC mens det like før gjennomslag er 1200 og 1400 pC. En mulig forklaring på hvorfor PD-amplituden øker skyldes at desto flere grener som utvikles og som nærmer seg jordplanet, jo høyere blir feltstyrken. Energiomsetningen vil dermed øke og igjen føre til større amplituder. For 50 Hz ble det derimot registrert at amplitudeverdiene gikk litt opp og ned rundt 8000 pC som vist i figur 4.24. En mulig forklaring på den jevne aktiviteten er at energien fra utladningene ved buskvekst ikke fører til like mye vekst i lengderetning, men fordeles jevnt over flere kanaler over hele strukturen. Disse kanalene kan vokse på kryss og tvers av hverandre, gjerne nær nålspissen, og dermed vil det elektriske feltet i gjennomsnitt være mindre påvirket av den lille veksten i lengderetning og føre til jevn amplitude.

Hvordan de partielle utladningene forekom for 10 Hz og 50 Hz i forhold til påtrykt sinusspenning er illustrert i figur 4.25 og 4.26. I forhold til hva som er beskrevet i kapittel 2.1, er disse resultatene motsatt i den forstand at positive utladninger forekommer når spenningen synker. Dette avviket skyldes at kalibreringen av PD-systemet i ettertid viste seg var gjort med motsatt poliaritet. Videre er det tydelig at de fleste utladningene var hulromsutladninger, men at det også oppstod enkelte coronautladninger.

Feilkilder

I arbeidet med denne masteroppgaven er det i hovedsak testobjektene og laboratorieoppsettet som er de største usikkerhetsmomentene. Da det antas riktig måleavlesning, ingen regnefeil og ingen feil på instrumentene, kan følgende parametere vært utslagsgivende for resultatene:

Urenheter: Under framstilling av testobjektene kan støvpartikler og annen forurensning ha blandet seg med isolasjonen og dannet ledende områder i isolasjonen. Dette kan igjen ha gjort at treveksten i noen områder vokste raskere enn det den skulle gjort.

Nålene: Ulik lengde og radius på nålene gjorde at feltstyrken var forskjellig fra prøve til prøve. Dette kan ha ført til ulikt vekstforløp til tross for samme påtrykk.

Antall prøver: Siden elektrisk trevekst og PD er et stokastisk fenomen, er fire prøver per påtrykk muligens for lite til å trekke noen statistiske slutninger.

Skarpe kanter: I målekretsen kan skarpe kanter være grunnen til at det oppstod corona. Dette kan igjen ha påvirket amplitudemålingen av de partielle utladningene i testobjektet.

Kapittel 6

Konklusjon

Resultatene fra forsøkene tyder på følgende:

- Lengdeutviklingen for elektriske trær i PEX er forskjellig for gren- og buskvekst. Ved grenvekst er vekstforløpet tilnærmet lineært, mens det for buskvekst typisk er en hurtig initiell vekst, en utfasingsperiode i midten før veksten øker igjen på slutten.
- Bredden av trestrukturen er lite påvirket av frekvenspåtrykket ved 14 kV til tross for ulik struktur. Typisk bredde på en trestruktur er $1100 \pm 100 \mu\text{m}$.
- Strukturen til elektriske trær i PEX er blant annet avhengig av hvilken spenning eller frekvens som påtrykkes. Ved 14 kV vil det oppstå grenstruktur når frekvensen er mellom 0,1 og 1,0 Hz, mens det for 5,0 vil skje en overgang fra gren- til buskvekst. Når frekvensen økes ytterligere til 50 Hz, vil buskstrukturen bli enda tettere. For 50 Hz oppstår ved alle målte spenningsnivå.
- Vekstraten øker tilnærmet proporsjonalt med frekvensen mellom 0,1 og 5,0 Hz ved 14 kV. Når frekvensen økes ytterligere opp til 50 Hz, vil strukturforandringen fra gren- til buskvekst føre til at vekstraten synker.
- Avstanden mellom trekanalene er avhengig av hvilken trestruktur som utvikles. Ved grenvekst er typisk avstand mellom kanalene $10 \mu\text{m}$, mens kanalene for tett buskvekst kan vokse sammen på kryss og tvers.
- PD-amplituden øker i forhold til startverdien når trekanalene nærmer seg jordplanet ved ordinær grenvekst. Ved tett buskvekst er PD-amplituden jevnere.

Videre arbeid

For å undersøke nærmere hvordan treveksten utvikler seg, vil det være aktuelt å utvide antall spennings- og frekvensnivå. Særlig vil det være interessant å gjennomføre forsøk med PEX helt ned mot 0,02 Hz siden VLF-testing gjennomføres ved denne frekvensen. Samtidig er det relevant å øke antall testobjekter for å danne et mer korrekt statistisk grunnlag.

Det ville vært spennende å måle den frigjorte energien i utladningene kvantitativt og dermed kunne undersøke nærmere relasjonen mellom vekstrate og energidissipering. I den forbindelse kunne målinger av antall utladninger vært aktuelt, og til dette kunne det vært bra å ha et velfungerende lavpassfilter for å dempe den kraftige støyen fra høyspenningsforsterkeren.

Videre kan det være aktuelt å bruke elektronmikroskopet til å analysere stoffsammensetning og sammenligne testobjekter med ulike trestrukturer.

Syndiotaktisk polypropylen (s-PP) har de senere årene vist seg som en mulig erstatning for PEX. Likevel gjenstår det mer forskning på dette området før PEX kan fases helt ut. Det vil derfor være relevant å se nærmere på elektrisk trevekst og utladningsaktivitet ved forskjellig spenninger og frekvenser i nettopp s-PP.

Bibliografi

- [1] Erling Ildstad
TET 4160 High Voltage Insulating Materials
NTNU, Trondheim
2011
- [2] OMICRON
<http://www.omicron.at/en/products/app/power-transformer/partial-discharge/>
20.03.2013
- [3] Eberhard Lemke
Guide for Partial Discharge measurement in compliance to IEC 60270
2008
- [4] Erling Ildstad
ELK-30 Condition Assessment of High Voltage Components
NTNU, Trondheim
2012
- [5] R.J. Densley
An Investigation Into The Growth of Electrical Trees in XLPE Cable Insulation
Ottawa, Canada
1979
- [6] Young-Shin Cho, Mi-Ja Shim, Sang-Wook Kim
Electrical tree initiation mechanism of artificial defects filled XLPE
University of Seoul, Sør Korea
1998
- [7] NAVSEA
<http://www.navsea.navy.mil/nswc/crane/sd18/Images1/Connectors/ConnectorsDeratingFig1.gif>
03.04.2013
- [8] G. Chen, C. H. Tham
Electrical treeing in XLPE insulation in frequency range between 20 and 500 Hz
Southampton, UK
2005

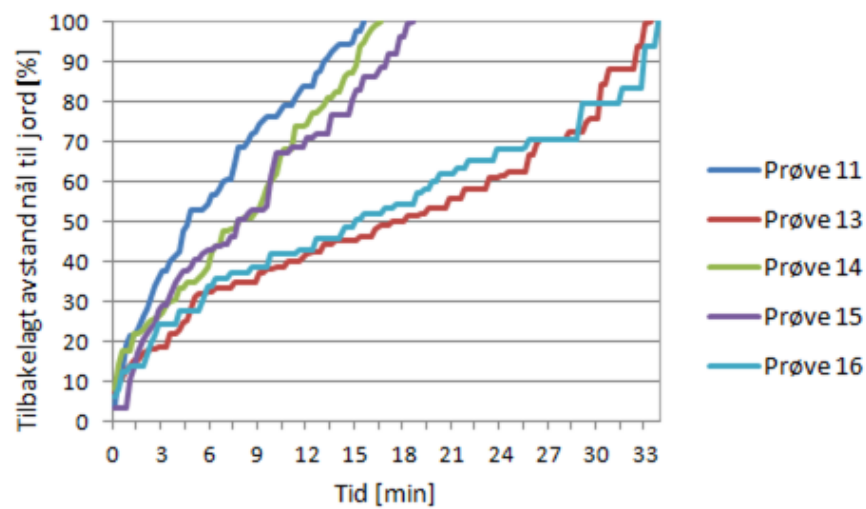
- [9] Xiaoquan Zheng, George Chen
Propagation Mechanism of Electrical Tree in XLPE Cable Insulation by investigating a Double Electrical Tree Structure
China/England
2008
- [10] Marit Ytterstad
Kvalitetssikring av polymerisolerte HVDC kabler ved hjelp av spenningsprøving
NTNU, Trondheim
2008
- [11] B.R. Varlow D.W. Auckland
Mechanical Aspects of Electrical Treeing in Solid Insulation
University of Connecticut, U.S
1996
- [12] Grace Jiang, Steven Boggs
Mechanism for Transition from Branch to Bush Electrical Tree
University of Manchester, U.K
1996
- [13] Xiangrong Chen, Yang Xu, Xiaolong Cao
Effect of Tree Channel Conductivity on Electrical Tree Shape and Breakdown in XLPE Cable Insulation Samples
Xi'an Jiaotong University, Kina
2011
- [14] Erling Ildstad, Kristian Fauskanger, Jorunn Holtø
Electrical Treeing form needle implants in XLPE during Very Low Frequency (VLF) voltage testing
NTNU, Trondheim
2013
- [15] A.S. Malinovski, M.D. Noskov, M. Sack, A.J. Schwab
Simulation of partial discharges and electrical tree growth in solid insulation under AC voltage
Vasterås, Sverige
1998
- [16] Ingeborg Lunde
Partielle utladningar og elektrisk trevekst i kryssbunden polyetylen og polypropylen isolasjon
NTNU, Trondheim
2012

- [17] Kristian Fauskanger
Partielle utladninger og elektrisk trevekst i ekstrudert polyetylen (PEX) ved lave frekvenser
NTNU, Trondheim
2012
- [18] Toan Thanh Tran
Elektrisk trevekst i ekstrudert syndiotaktisk polypropylen (sPP) kabelisolasjon
NTNU, Trondheim
2012
- [19] P.Valatka, V. Sucila, G. Dauksys
Investigation of the Voltage Influence on Partial Discharge Characteristic Parameters in Solid Insulation
Kaunas Technical College, Litaunen
2010

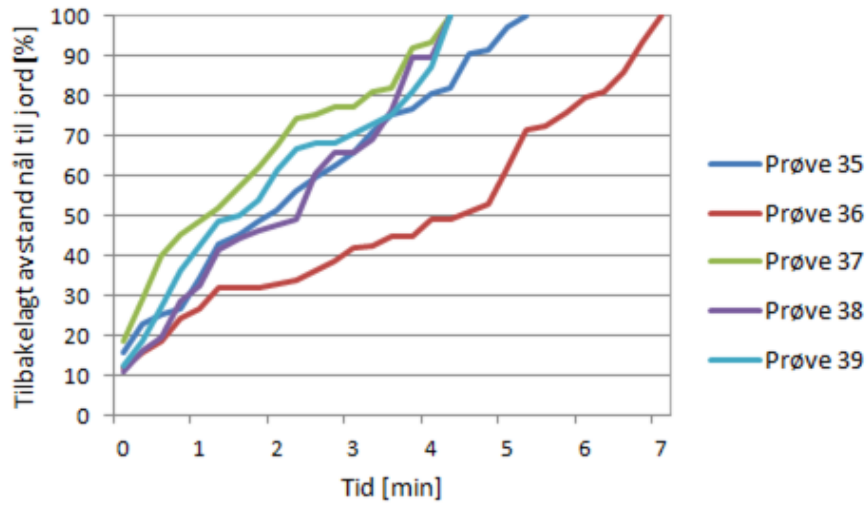
Tillegg A

Trevekst

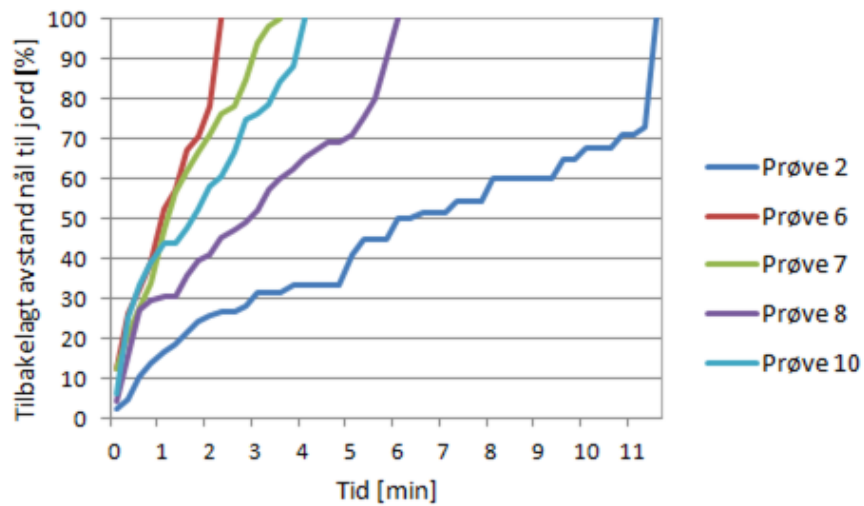
A.1 Lengdeutvikling



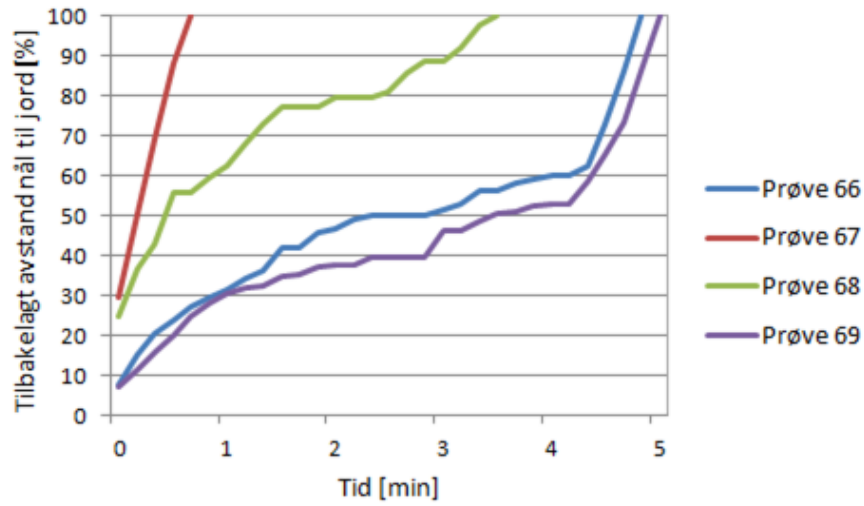
Figur A.1: Lengdeutvikling ved 14 kV 0,1 Hz



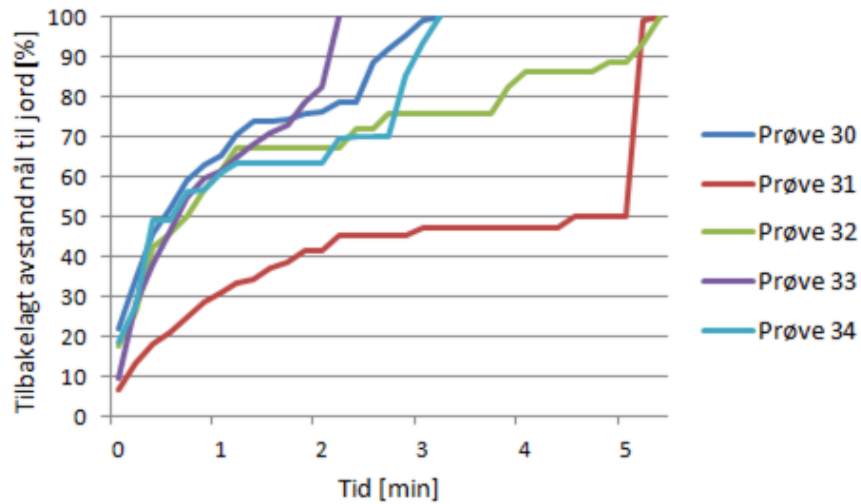
Figur A.2: Lengdeutvikling ved 14 kV 0,5 Hz



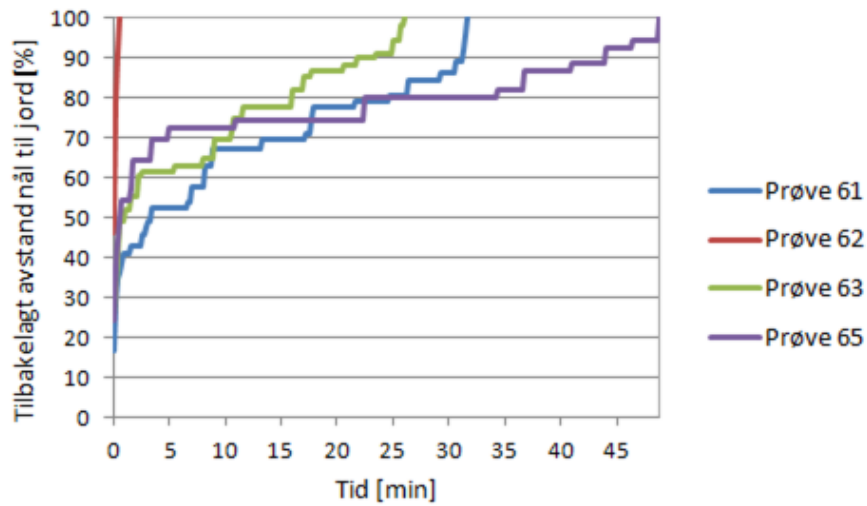
Figur A.3: Lengdeutvikling ved 14 kV 1,0 Hz



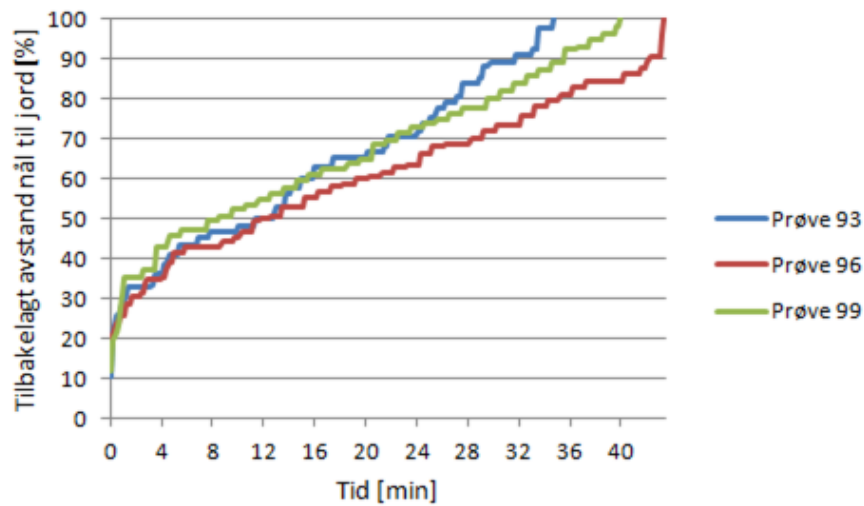
Figur A.4: Lengdeutvikling ved 14 kV 5,0 Hz



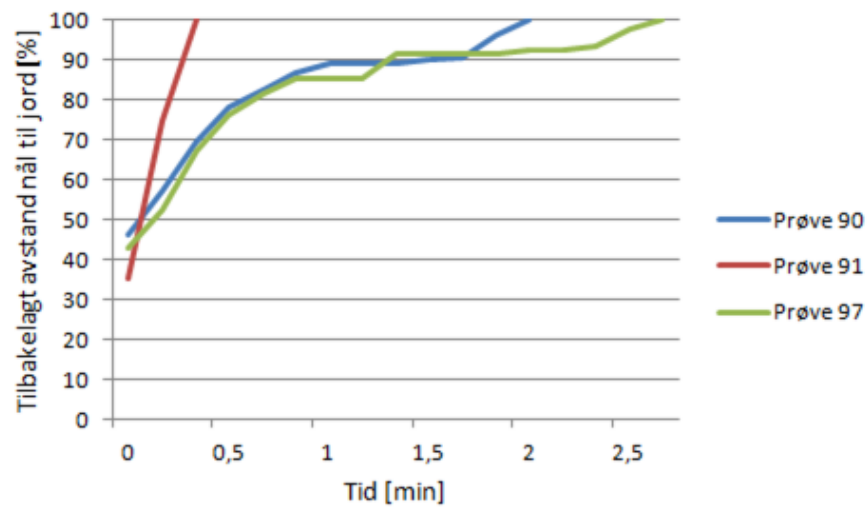
Figur A.5: Lengdeutvikling ved 14 kV 10 Hz



Figur A.6: Lengdeutvikling ved 14 kV 50 Hz

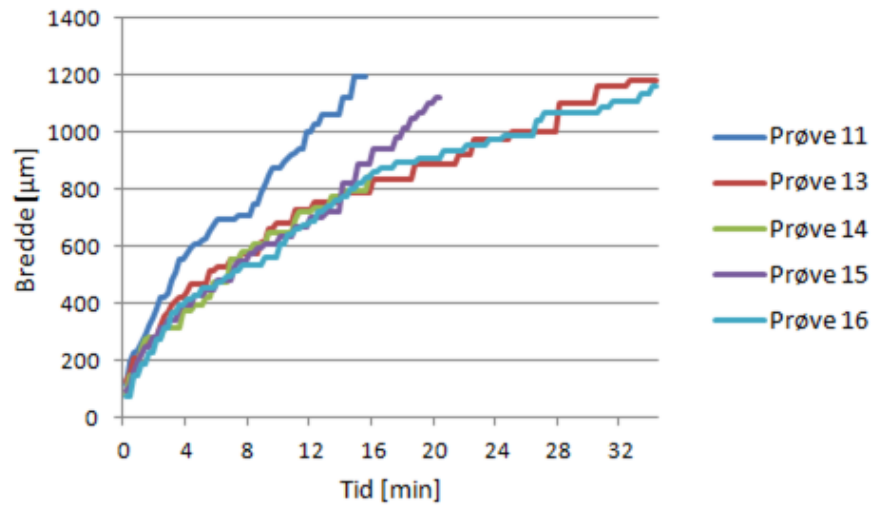


Figur A.7: Lengdeutvikling ved 10 kV 50 Hz

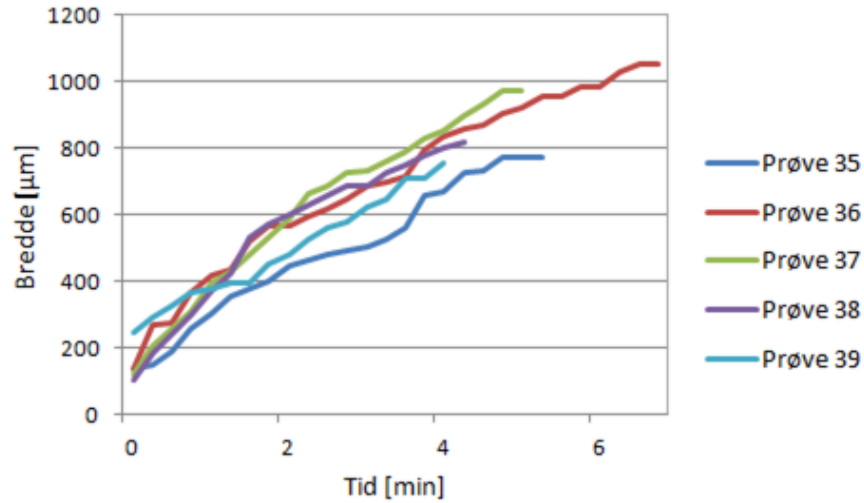


Figur A.8: Lengdeutvikling ved 20 kV 50 Hz

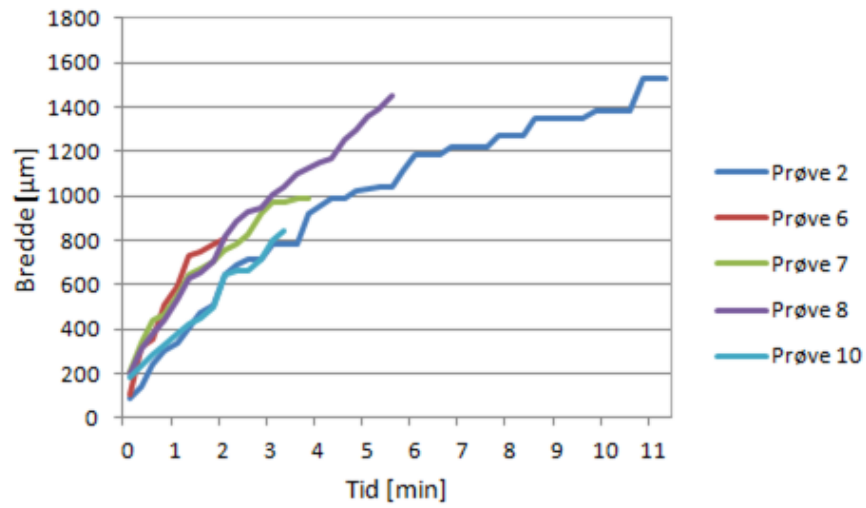
A.2 Breddeutvikling



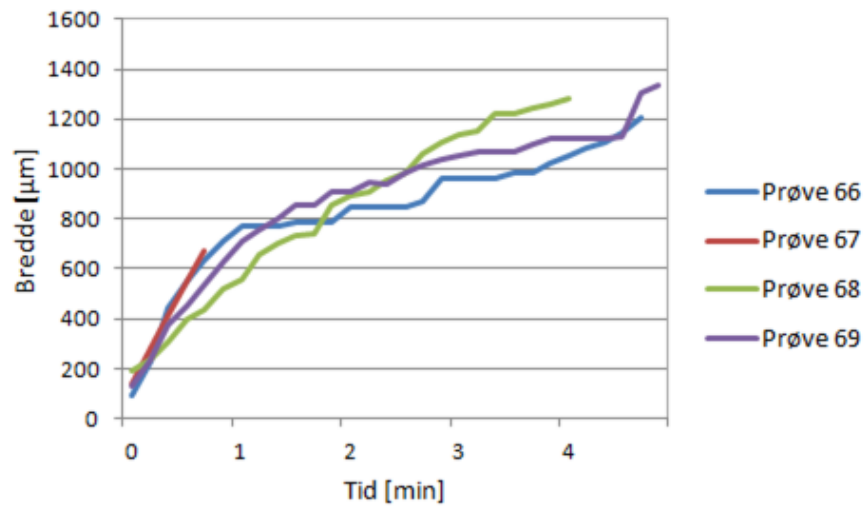
Figur A.9: Breddeutvikling ved 14 kV 0,1 Hz



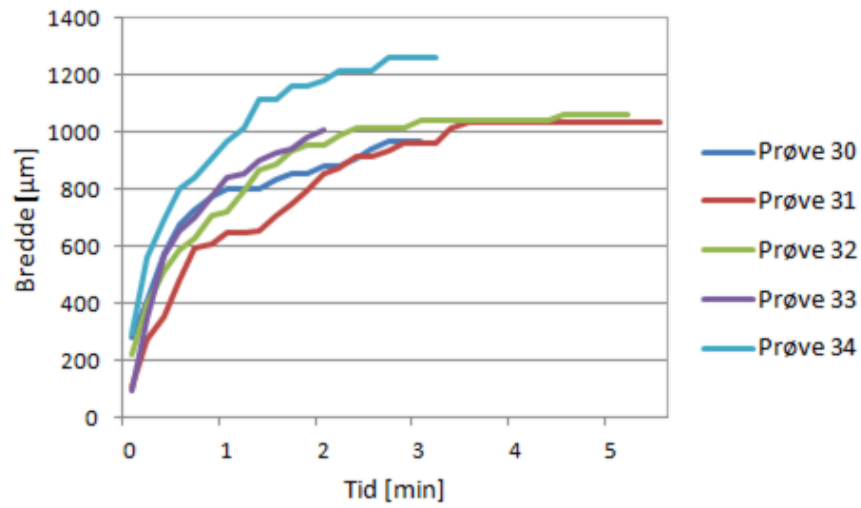
Figur A.10: Breddeutvikling ved 14 kV 0,5 Hz



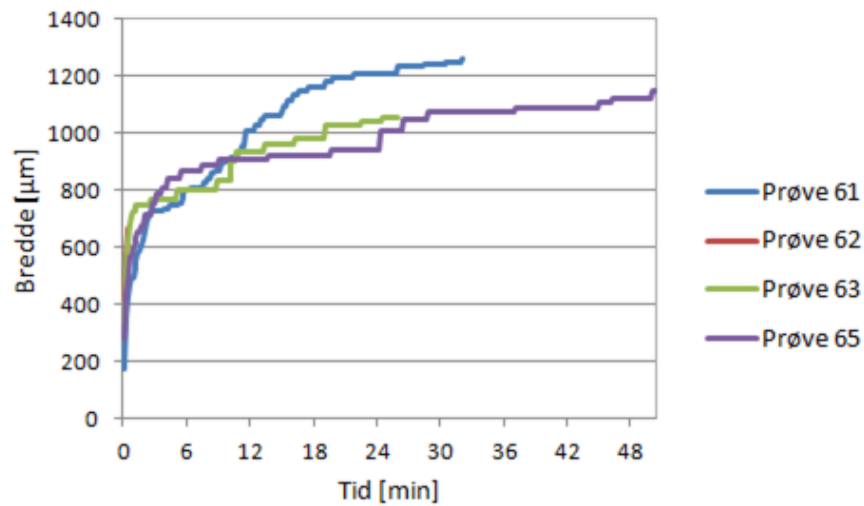
Figur A.11: Breddeutvikling ved 14 kV 1 Hz



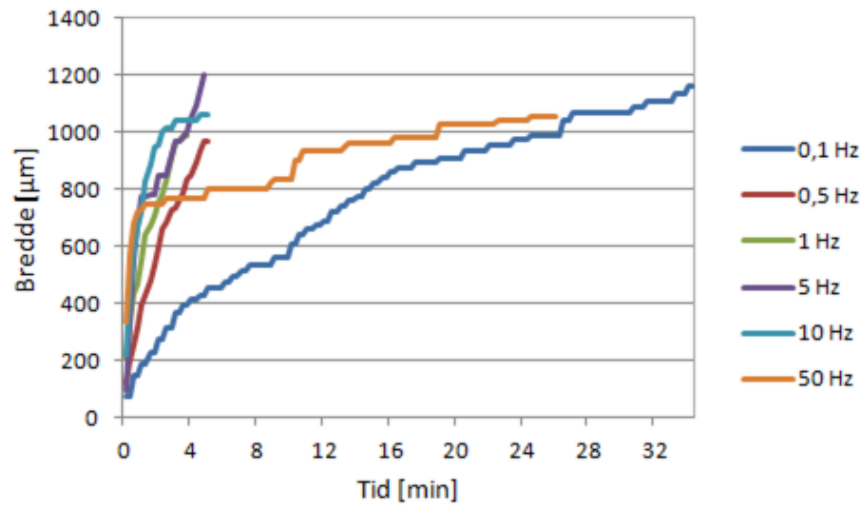
Figur A.12: Breddeutvikling ved 14 kV 5 Hz



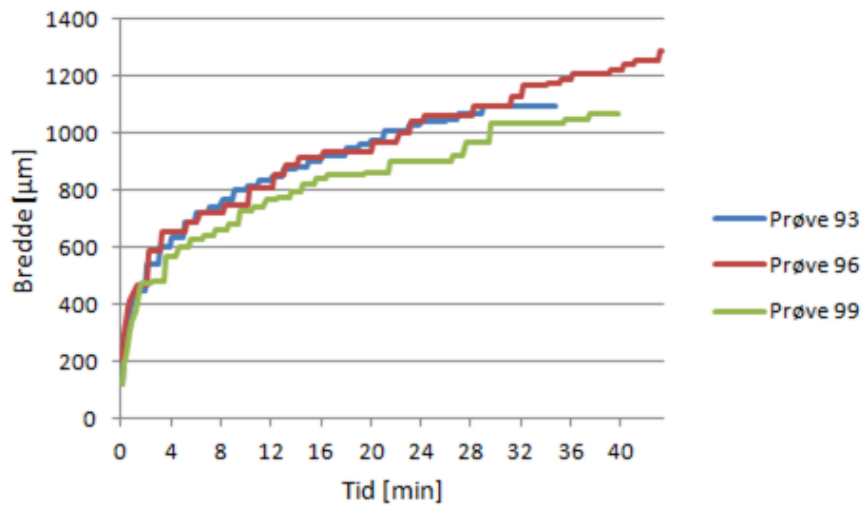
Figur A.13: Breddeutvikling ved 14 kV 10 Hz



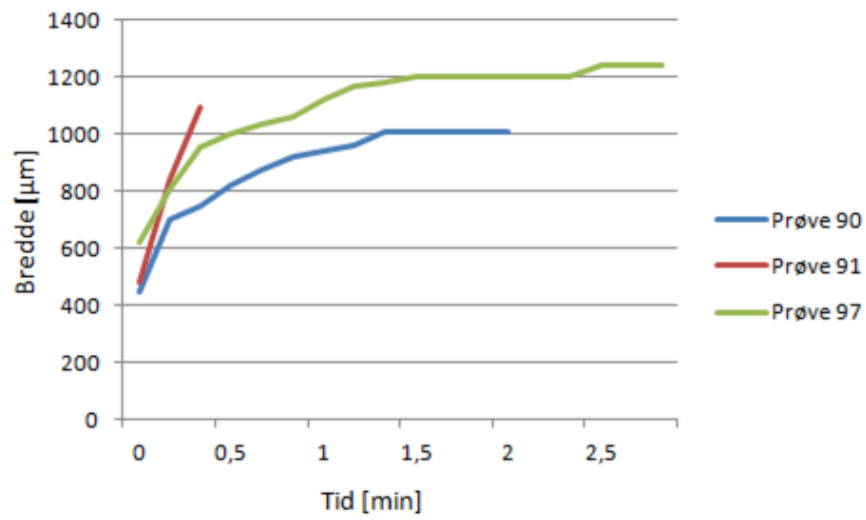
Figur A.14: Breddeutvikling ved 14 kV 50 Hz



Figur A.15: Typisk breddeutvikling ved 14 kV

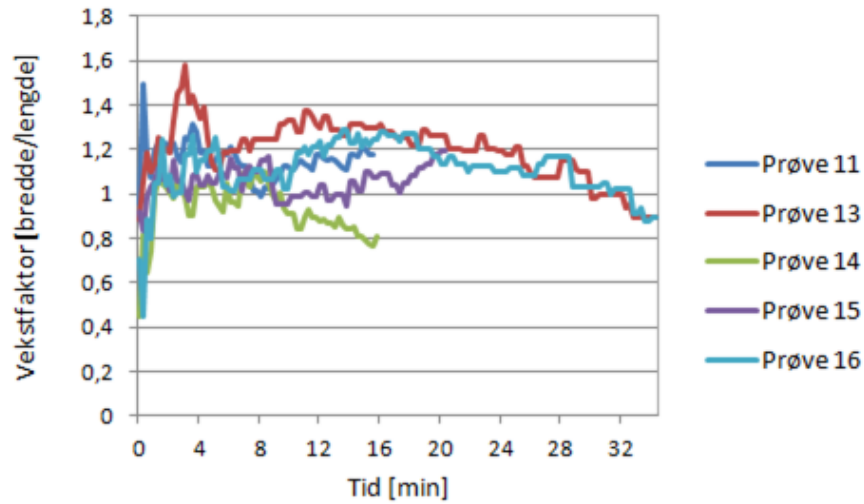


Figur A.16: Breddeutvikling ved 10 kV 50 Hz

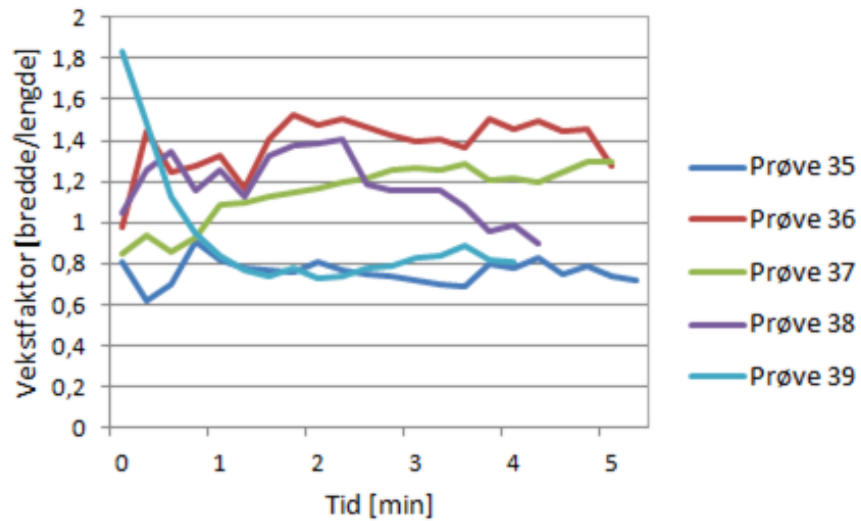


Figur A.17: Breddeutvikling ved 20 kV 50 Hz

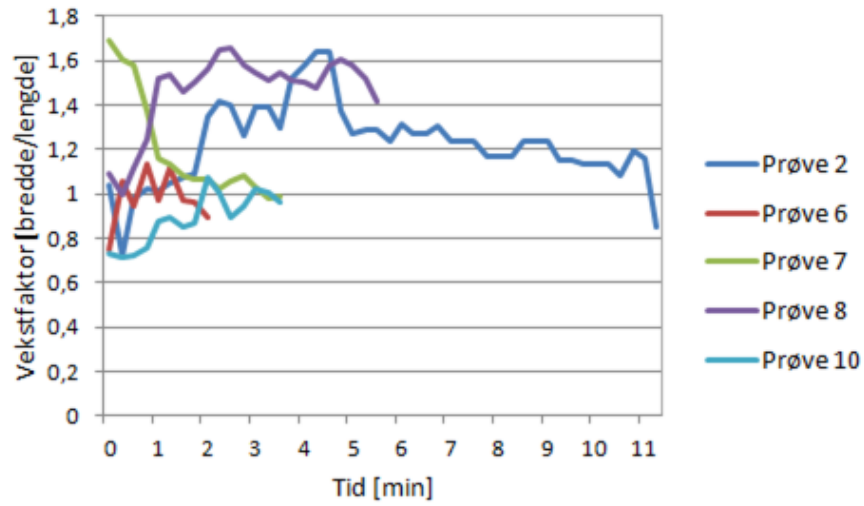
A.3 Vekstfaktor



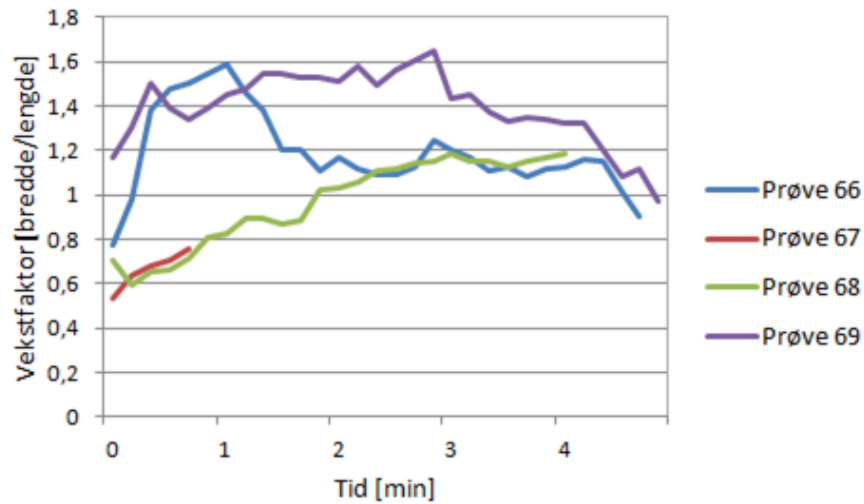
Figur A.18: Vekstfaktor 14 kV 0,1 Hz



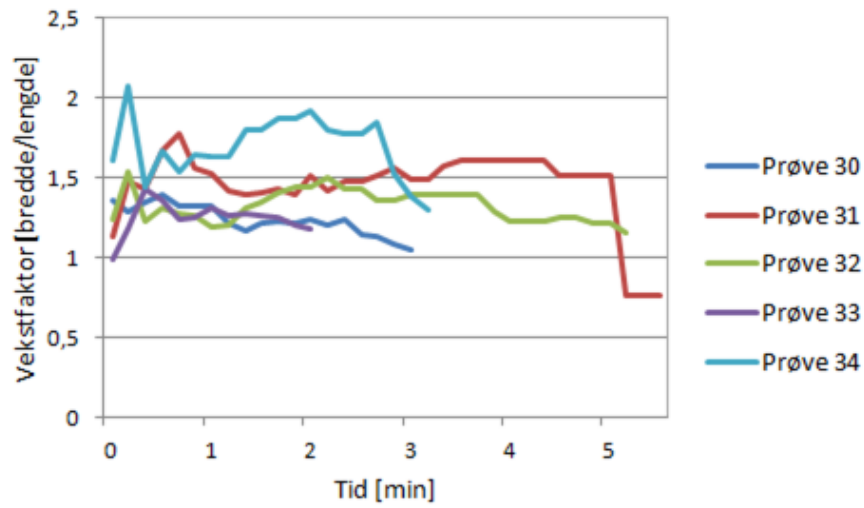
Figur A.19: Vekstfaktor 14 kV 0,5 Hz



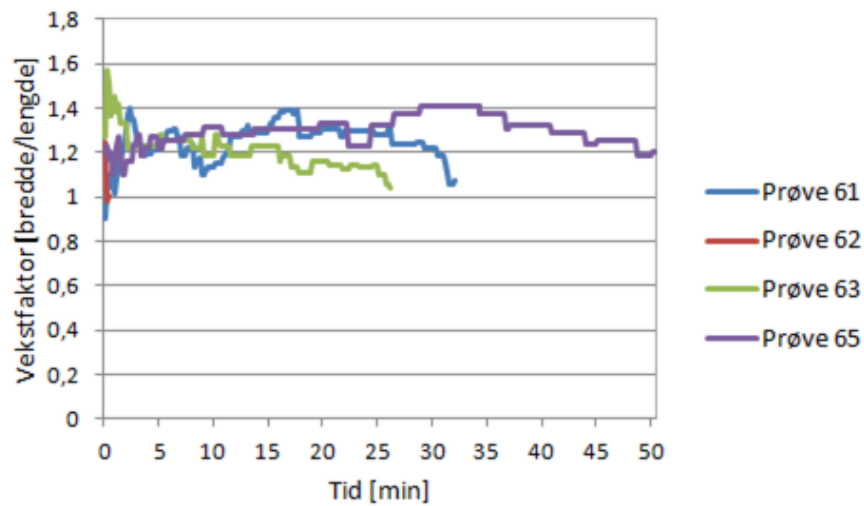
Figur A.20: Vekstfaktor 14 kV 1,0 Hz



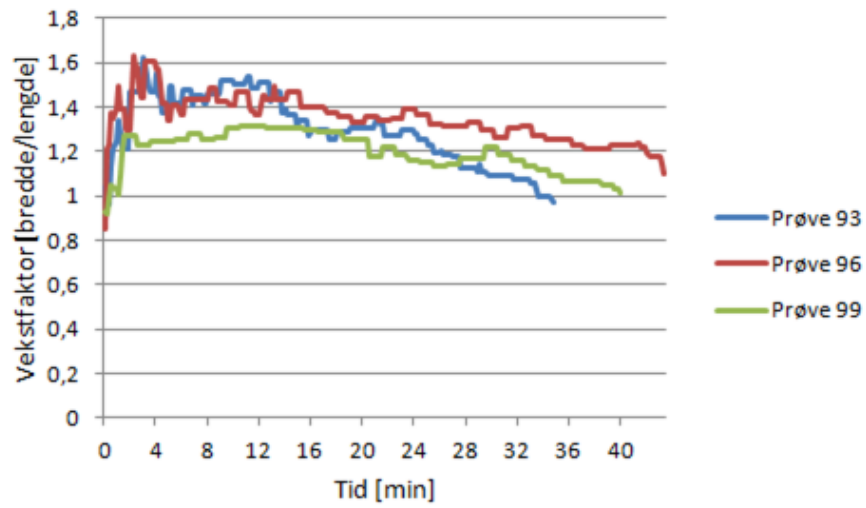
Figur A.21: Vekstfaktor 14 kV 5,0 Hz



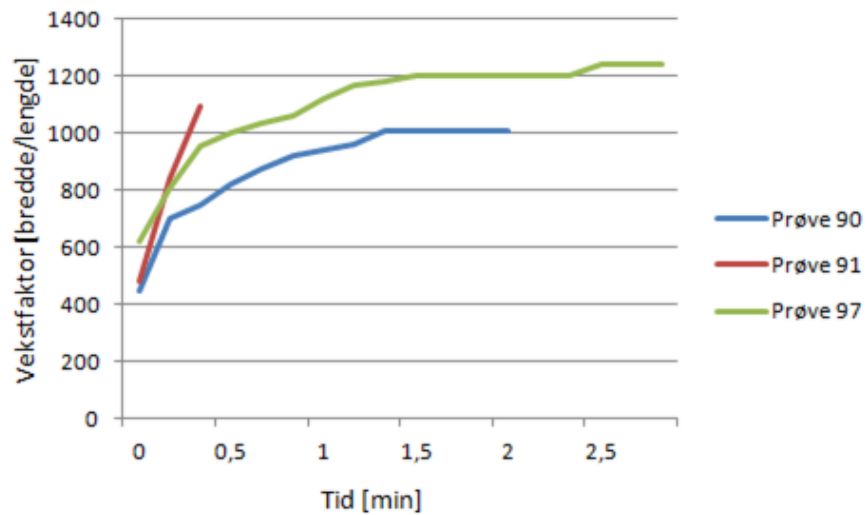
Figur A.22: Vekstfaktor 14 kV 10 Hz



Figur A.23: Vekstfaktor 14 kV 50 Hz



Figur A.24: Vekstfaktor 10 kV 50 Hz

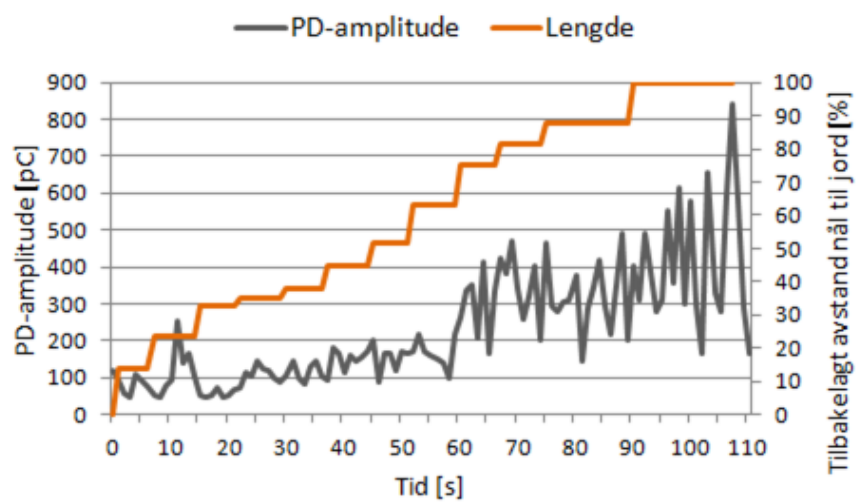


Figur A.25: Vekstfaktor 20 kV 50 Hz

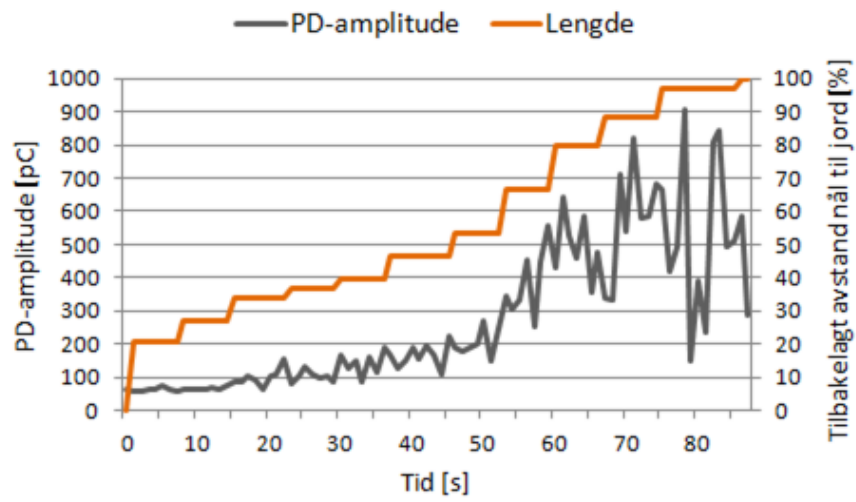
Tillegg B

Utladningsaktivitet

B.1 Utvikling

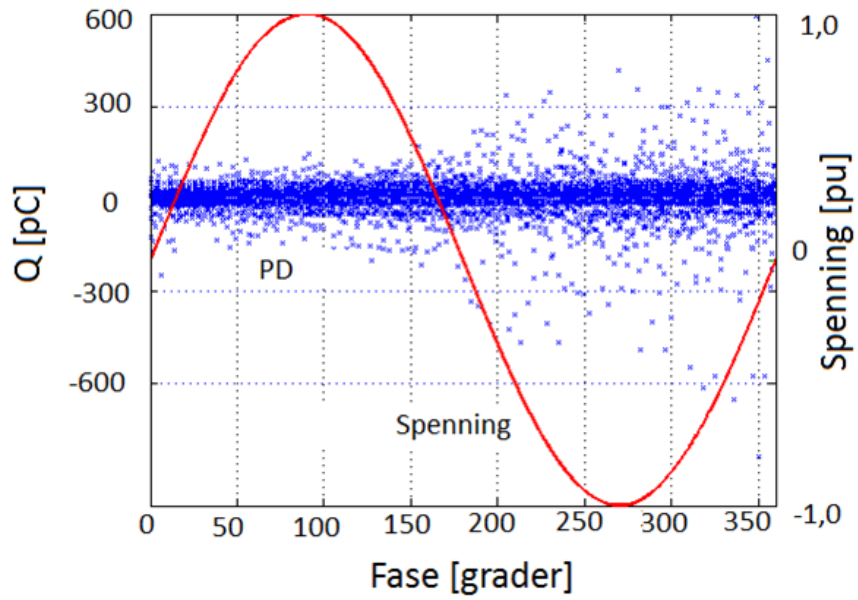


Figur B.1: PD-utvikling 14 kV 0,1 Hz

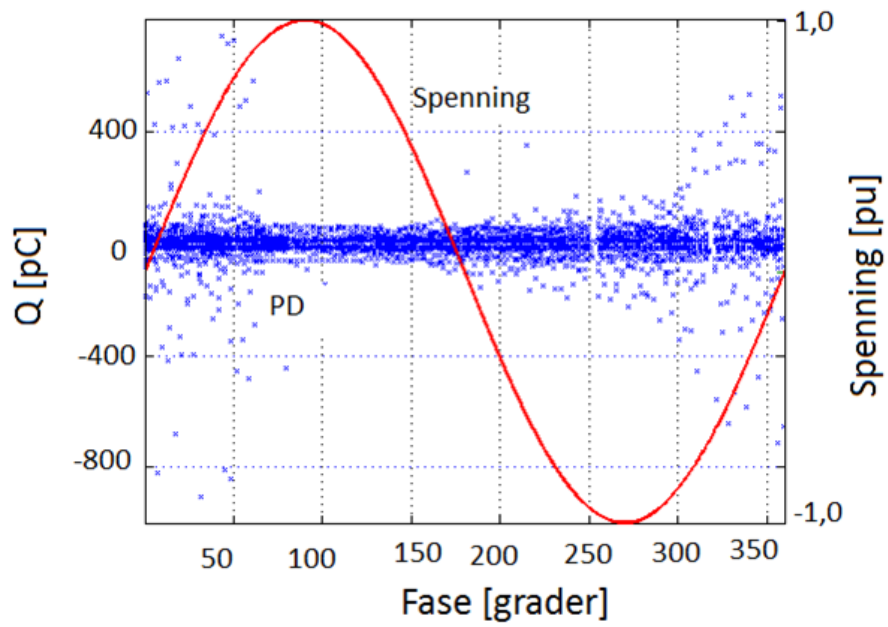


Figur B.2: PD-utvikling 14 kV 1,0 Hz

B.2 Faseplot



Figur B.3: Faseplot 14 kV 0,1 Hz



Figur B.4: Faseplot 14 kV 1,0 Hz

Tillegg C

Matlab

```
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');
10 %Input fra brukeren
11 t1=input('Starttidspunkt i sekund: ');
12 step=input('Lengde for intervall i sekund: ');
13 t=input('Tidspunkt for gjennomslag i sekund: ');
14 t3 = t + t1; %Tiden det er gjennomslag
15 t2 = t1 + step;
16
17 %Deklarasjon av variabler
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, ...
24 %qmaks-abs, q-snitt]
25
26 while (t1 < (t3))
27 %Finner posisjonen til t1 og t2
28 t1_rekke = find(q_tm<=t1);
29 t1_pos = length(t1_rekke);
30 t2_rekke = find(q_tm<=t2);
31 t2_pos = length(t2_rekke);
32 %Nullstilling og deklarasjon av variabler
33 sumq=0; %total utladning i intervall
34 n = 1; %antall utladninger i ...intervall
35
36 data(r,1) = ((r-1)*(step/60)); %Nr paa intervall
37 data(r,3) = 0;
```

```

38
39 for i = (t1_pos + 1) : (t2_pos) %har t1+1 for aa
      unngaa aa starte paa 0
40
41 %if-lokke: finner maksimale ladning i absoluttverdi
42 if data(r,3) < abs(q(i))
43 data(r,3) = abs(q(i));
44 else
45 data(r,3) = data(r,3);
46 end
47
48 %Finner fortlopende gjennomsnittelig ladning
49 sumq = sumq + abs(q(i));
50 data(r,4) = sumq/n;
51 %Lagrer fortlopende antall utladinger
52 data(r,2) = n ;
53 %Oppdaterer telleren for antall utladinger til neste
      iterasjon
54 n = n+1;
55 end
56
57 %Oppdaterer variabler til neste iterasjon
58 t1 = t1 + step;
59 t2 = t2 + step;
60 r = r + 1;
61 end
62
63 % Gjør om ladningen sin størrelse til pC
64 data(:,3) = data(:,3)/(1e-012);
65 data(:,4) = data(:,4)/(1e-012);
66 %
67 %mengde_storrelse(data(:,1), data(:,2), data(:,3))
68 %mengde_gjsnittQ(data(:,1), data(:,2), data(:,4))

```